

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JÉSSICA FREIRE FONSECA

**EFEITOS DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E ESCÓRIA DE ACIARIA COMO FÍLERES
NA RIGIDEZ VISCOELÁSTICA LINEAR E
CARACTERÍSTICAS DE FRATURA DA MATRIZ DE
AGREGADOS FINOS**

VITÓRIA

2016

JÉSSICA FREIRE FONSECA

**EFEITOS DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E ESCÓRIA DE ACIARIA COMO FÍLERES
NA RIGIDEZ VISCOELÁSTICA LINEAR E
CARACTERÍSTICAS DE FRATURA DA MATRIZ DE
AGREGADOS FINOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Prof.^a Ph.D Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira.

VITÓRIA

2016

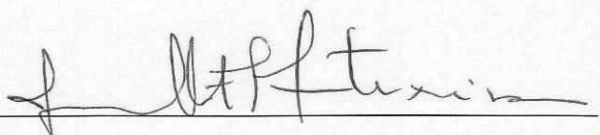
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**EFEITOS DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E ESCÓRIA DE ACIARIA COMO FÍLERES NA RIGIDEZ
VISCOELÁSTICA LINEAR E CARACTERÍSTICAS DE FRATURA DA
MATRIZ DE AGREGADOS FINOS**

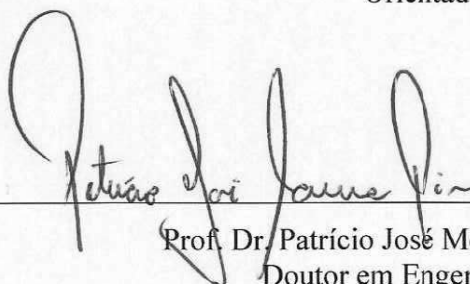
Jéssica Freire Fonseca

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

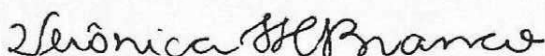
Aprovada no dia **15 de junho de 2016** por:



Profa. Ph.D. Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira
Ph.D. em Engenharia Civil
Orientadora - UFES



Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES



Profa. Ph.D. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Ph.D. em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFC
Por meio de videoconferência

Vitória – ES, junho de 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

F676e Fonseca, Jéssica Freire, 1991-
Efeitos do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e escória de aciaria como fíleres na rigidez viscoelástica linear e características de fratura da matriz de agregados finos / Jéssica Freire Fonseca. – 2016.
121 f. : il.

Orientador: Jamilla Emi Sudo Lutif Teixeira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Rochas ornamentais – Resíduos – Reaproveitamento. 2. Pavimentos de asfalto – Fadiga. 3. Viscoelasticidade. 4. Escória – Resíduos industriais. 5. Trincamento por fadiga. 6. Matriz de agregados finos (MAF). I. Lutif, Jamilla Emi Sudo Teixeira. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me permitir essa oportunidade de crescimento profissional e por ter me dado condições para prosseguimento desta jornada.

Agradeço à minha família por me dar o suporte e apoio necessário para que eu alcançasse meus objetivos pessoais e profissionais.

Agradeço ao meu namorado, Rodrigo, pelo amor, compreensão e apoio durante este período. Obrigada por me fazer feliz!

Agradeço à minha orientadora, Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira, por ter me guiado e compartilhado seu conhecimento, pela atenção e disponibilidade para me atender sempre que tinha dúvidas, pela motivação para encontrar soluções nas dificuldades enfrentadas durante os ensaios experimentais e pela inspiração para que um dia me torne uma profissional de tamanha competência.

Agradeço aos professores Patrício Pires e Verônica Castelo Branco por fazerem parte da banca examinadora da minha dissertação e pelas contribuições para melhoramento da pesquisa desenvolvida.

Agradeço aos professores e colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES, pelo conhecimento transmitido e disponibilidade.

Agradeço aos meus colegas que ganhei durante o mestrado, que compartilharam das mesmas dúvidas, expectativas e dos aprendizados valiosos adquiridos durante esta etapa.

Agradeço ao Reuber Freire, Renato Coutinho e Pravat Karki que foram solícitos no esclarecimento de dúvidas sobre a realização de alguns ensaios.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) e do Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES) da UFES e à aluna de iniciação científica, Ariana Tonon, pela ajuda para desenvolvimento dos ensaios.

Agradeço ao Centro de Competência em Manufatura do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (CCM/ITA) e ao Laboratório de Tecnologia Mecânica da UFES pela fabricação do compactador manual e bases metálicas, respectivamente, utilizados neste estudo.

Agradeço a FAPES pela bolsa de estudos e projeto de pesquisa financiado.

RESUMO

Os problemas mais comuns nos pavimentos asfálticos são o trincamento por fadiga e a deformação permanente que podem ocorrer mesmo antes do pavimento atingir sua vida útil de projeto. Esses problemas estão relacionados a fenômenos de menores escalas, como as microtrincas, concentração de tensão na interface entre os agregados e o ligante asfáltico e a dissipação de energia devido ao comportamento viscoelástico do material. O principal objetivo deste estudo foi avaliar a potencialidade do uso do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler na porção fina das misturas asfálticas, conhecida como Matriz de agregados finos (MAF). Para atingir este objetivo, cinco diferentes misturas de MAF foram feitas substituindo: 2% como fíler de RBRO, 2% como fíler de EMA, 2% como fíler de RBRO+EMA, 2% como fíler de cal hidratada e a mistura de referência. Os efeitos destes materiais na MAF foram investigados realizando-se ensaios de varredura de frequência para avaliação das características da rigidez viscoelástica linear, ensaio de fratura em amostra de geometria semi-circular e ensaio de varredura de tempo para avaliar as características de fratura. Dessa forma, obteve-se um melhor entendimento da influência do tipo de fíler (RBRO e EMA) nas propriedades viscoelásticas da MAF, através de análises das curvas mestras do módulo complexo e ângulo de fase e das características de dano da MAF, através de análises da energia de fratura e curvas características do dano ($C \times S$). Os resultados mostraram que, no geral, a mistura que apresentou o melhor desempenho, para as características de fratura e da rigidez viscoelástica linear, foi com 2% de RBRO+EMA, apresentando a mesma tendência encontrada em outros trabalhos que também utilizaram os mesmos resíduos. Pode-se concluir que a utilização dos dois resíduos aplicados conjuntamente em concretos asfálticos apresenta-se, a princípio, viável tanto do ponto de vista ambiental quanto tecnológico.

Palavras-chave: Rochas ornamentais, Matriz de Agregados Finos (MAF), Trincamento por fadiga, Rigidez viscoelástica, Escória de Aciaria.

ABSTRACT

The most common problems in asphalt pavements are fatigue cracking and rutting that may occur even before the pavement reaches its projected service life. These distresses are related to a small scale phenomenon, such as micro cracks, stress concentration at the interface between aggregates and asphalt binder, and energy dissipation due to binder viscoelastic behavior. The main objective of this study was to evaluate the potential use of Ornamental Rocks Fine By-Products (RBRO) and Steel Slag Residue (EMA) as filler materials on the fine portion of asphalt mixtures, known as Fine Aggregates Matrix (FAM). To achieve this goal, five different types of FAM mixtures were fabricated by replacing: 2% as filler of RBRO, 2% as filler of EMA, 2% as filler of RBRO+EMA, 2% as filler of hydrated lime and the control mixture. The effects of those materials on FAM were investigated by performing Frequency Sweep Tests (FS) to evaluate linear viscoelastic stiffness characteristics, Semi-Circular Bending Tests (SCB) and Time Sweep Tests (TS) to evaluate fracture characteristics. Thus, it was obtained a better understanding of the influence of type of filler (RBRO and EMA) on the FAM viscoelastic properties, by analyses of complex modulus and phase angle master curves and FAM damage characteristics, by analyses of fracture energy and damage characteristics curves ($C \times S$). The results, in general, presented a better performance of FAM RBRO+EMA, for both fracture and linear viscoelastic stiffness characteristics, and this tendency was observed by others authors works using same residues. Therefore, it could be concluded that the application of RBRO+EMA in asphalt concrete presents viable from environmental point of view as well as technological.

Keywords: Ornamental Rocks, Fine Aggregate Matrix (FAM), Fatigue cracking, Linear viscoelastic stiffness, Steel slag residue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de produção de peças a partir de rochas ornamentais	9
Figura 2 - Processo de corte e desdobramento de Rochas ornamentais.....	11
Figura 3—Organograma dos componentes do concreto asfáltico	24
Figura 4 - Molde para fabricação de MAF's.....	27
Figura 5—(a) Corpo-de-prova obtido no compactador giratório Superpave (b) Corpo-de-prova com as amostras de MAF extraídas.....	28
Figura 6 - Molde para fabricação e compactação de MAF's	32
Figura 7 - Representação do ensaio de varredura de deformação (a), e representação da determinação da deformação crítica (b).	34
Figura 8 – Representação de curva mestre, na temperatura de 25° C, para o CAP 50/70, nas condições virgem, RTFOT e PAV.....	35
Figura 9 – Representação da construção da curva mestra para o módulo de relaxação de um material	37
Figura 10 - Semi-Circular Bend Test (SCB)	39
Figura 11 - Esquema da produção dos corpos-de-prova SCB	40
Figura 12 – Matriz experimental	49
Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos.....	51
Figura 14- Processos de preparação dos resíduos para sua aplicação.....	52
Figura 15 - Diâmetro das partículas de RBRO	53
Figura 16 - Características mineralógicas das partículas de RBRO.....	54
Figura 17 – Micrografia do RBRO	55
Figura 18 – Regiões de análise no EDS para o RBRO	56
Figura 19 - Diâmetro das partículas de EMA.....	58
Figura 20 – Características mineralógicas das partículas de EMA	58
Figura 21 – Micrografia da EMA.....	60
Figura 22 - Regiões de análise no EDS para a EMA	61
Figura 23 - Características mineralógicas das partículas da Cal.....	62
Figura 24 - Diâmetro das partículas da Cal.....	63
Figura 25 - Distribuição granulométrica da MAC e sua respectiva MAF	66
Figura 26 – Teor de projeto para cada tipo de mistura.....	67
Figura 27 – Procedimento para dosagem da MAF.....	69
Figura 28 – Molde para fabricação das amostras de MAF's	71

Figura 29 – Reômetro de cisalhamento e MAF's acopladas em seu interior	72
Figura 30 - Produção de amostras semicirculares para ensaio SCB	73
Figura 31 - Amostra semicircular no início e no fim do ensaio SCB.....	75
Figura 32 – Obtenção de parâmetros da curva (Força x Deslocamento).....	75
Figura 33 – Critério de ruptura da amostra ensaiada	76
Figura 34 - Ensaio de varredura de frequência para obtenção de m	77
Figura 35 – Curvas mestras do $ G^* $, à 40°C das MAF's	80
Figura 36 - Curvas mestras do δ , à 40°C das MAF's	80
Figura 37 – Curvas obtidas com o ensaio SCB.....	82
Figura 38 – Curvas média (Carga x Deslocamento) obtidas no ensaio SCB	83
Figura 39 – Média das energias até a carga máxima para cada mistura	85
Figura 40 - Curva característica do dano - MAF Referência	87
Figura 41 - Curva característica do dano - MAF CAL.....	88
Figura 42 - Curva característica do dano - MAF RBRO+EMA	88
Figura 43- Curva característica do dano - MAF RBRO	89
Figura 44- Curva característica do dano - MAF EMA.....	89
Figura 45– Curvas características do dano para os diferentes tipos de misturas asfálticas.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Maiores produtores mundiais de rochas	7
Tabela 2 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2013.....	7
Tabela 3 – Caracterização química do RCG por diferentes autores	12
Tabela 4 - Produção mundial de aço bruto	14
Tabela 5 – Composição química da escória de aciaria produzida pelo processo LD no mundo	15
Tabela 6 - Caracterização do CAP 50/70	50
Tabela 7 – Massa específica dos agregados	51
Tabela 8 - Análise química semiquantitativa do RBRO	54
Tabela 9 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO	57
Tabela 10 - Análise química semiquantitativa de EMA	59
Tabela 11 - Resultado da análise química do EDS para a EMA	61
Tabela 12 - Distribuição granulométrica da MAC de referência	64
Tabela 13- Distribuição granulométrica da MAC com substituição de 2% de fíler	64
Tabela 14 – Distribuição granulométrica dos agregados na MAF de referência	65
Tabela 15 - Distribuição granulométrica dos agregados na MAF com substituição de fíler	65
Tabela 16 - Resultado da dosagem das MAF's.....	78
Tabela 17–Resultados do ensaio de fratura nas MAF's.....	84
Tabela 18 – Valores do parâmetro α	86
Tabela 19 – Coeficientes da Power Law – C11 e C12	90
Tabela 20 - Média e coeficiente de variação da integridade do material (C_f) e dano acumulado (S_f) na ruptura	91

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	OBJETIVO GERAL	3
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>6</u>
2.1	CONCEITUAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS	6
2.1.1	RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS	8
2.2	CONCEITUAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	13
2.2.1	CONCEITO E FORMAS DE GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	13
2.3	CONCRETO ASFÁLTICO	17
2.3.1	DEFINIÇÃO	17
2.3.2	IMPORTÂNCIA DO FÍLER PARA AS MISTURAS ASFÁLTICAS	18
2.3.3	UTILIZAÇÃO DE RBRO E EMA COMO FÍLER EM MISTURAS ASFÁLTICAS	21
2.4	PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CA ATRAVÉS DO ESTUDO DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS	23
2.4.1	MÉTODOS DE DOSAGEM E FABRICAÇÃO DE MAF'S	25
2.5	ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA INVESTIGAÇÃO DA RIGIDEZ VISCOELÁSTICA E TRINCAS NA MAF	32
2.5.1	ENSAIO DE VARREDURA DE DEFORMAÇÃO	32
2.5.2	ENSAIO DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA	34
2.5.3	ENSAIOS DE FRATURA	38
2.5.3.1	Ensaio de fratura em corpo-de-prova com geometria semi-circular (Semi-Circular Bending Test – SCB)	39
2.5.3.2	Ensaio de varredura de tempo	43
3	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	<u>48</u>
3.1	MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL	48
3.1.1	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)	50
3.1.2	AGREGADOS	50
3.1.2.1	Análise granulométrica	51
3.1.3	RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO)	52
3.1.4	ESCÓRIA MOÍDA DE ACIARIA (EMA)	57
3.1.5	CAL	62
3.2	DEFINIÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MAF'S	63
3.3	DOSAGEM DAS MAC'S E MAF'S	66
3.3.1	DOSAGEM DA MAC	66
3.3.2	METODOLOGIA DE DOSAGEM DA MAF	67
3.4	FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE MAF PARA ENSAIOS OSCILATÓRIOS	70

3.5	FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS SEMICIRCULARES DE MAF PARA ENSAIO DE FRATURA	72
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS NAS MAF'S	74
3.6.1	ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR	74
3.6.2	ENSAIO DE FRATURA EM CORPO-DE-PROVA COM GEOMETRIA SEMI-CIRCULAR– SCB.....	74
3.6.3	ENSAIO DE VARREDURA DE TEMPO.....	76
<u>4</u>	<u>RESULTADOS</u>	<u>78</u>
4.1	DOSAGEM DA MAF	78
4.2	CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR DAS MAF'S.....	79
4.3	PROPRIEDADES DE FRATURA DAS MAF'S – ENSAIO SCB	81
4.4	ENSAIO DE VARREDURA DE TEMPO NAS MAF'S.....	86
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DA MAF, CA E MÁSTIQUE.....	92
<u>5</u>	<u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS</u>	<u>95</u>
5.1	CONCLUSÕES	95
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	96
	<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>98</u>

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho está relacionado com a área de infraestrutura rodoviária. De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de rodovias do ano de 2015, apesar da predominância do modal rodoviário no transporte de mercadorias e pessoas no Brasil, verifica-se que apenas uma parcela da extensão total da malha rodoviária é pavimentada. Segundo o levantamento realizado em 2015 pela CNT existem, no país, 1.720.607 km de rodovias, onde apenas 213.299 km são pavimentados, ou seja, apenas 12,4% da malha. A má qualidade da infraestrutura rodoviária brasileira eleva os custos no setor de transportes, repassando estes custos para os produtos e serviços gerando, desta forma, um impacto negativo na economia nacional.

É de fundamental importância para o desenvolvimento do país, para a redução de acidentes e para a sustentabilidade que a infraestrutura rodoviária apresente condições aceitáveis de uso, de forma a otimizar o tempo gasto nas viagens, reduzir o custo operacional dos veículos e reduzir os riscos dos usuários e emissão de poluentes. Dada a importância do transporte rodoviário na movimentação de bens e pessoas no Brasil, são necessários contínuos investimentos na renovação de materiais e técnicas construtivas com o objetivo de se obter pavimentos com desempenho estrutural satisfatório e vida útil prolongada.

A maioria das rodovias brasileiras é constituída de pavimentos do tipo flexível, também chamados de pavimentos asfálticos. Concretos asfálticos geralmente exibem um comportamento constitutivo inelástico e são compostos de inúmeras partículas orientadas de forma não regular e de diversos tamanhos. Além do comportamento inelástico e da complexidade da geometria de seus constituintes, quando solicitados pelas ações do tráfego, os concretos asfálticos podem desenvolver milhares de micro e macro trincas antes de sua completa falência. Soluções analíticas para este problema são quase que impossíveis de se obter (ARAGÃO, 2011; LUTIF, 2011; IZADI, 2012; MOTAMED et al., 2012). Fazer previsão e avaliação do comportamento estrutural em concretos asfálticos considerando ainda danos associados ao aparecimento e propagação de trincas em diferentes escalas é um desafio devido à natureza complexa deste material compósito.

As grandes áreas afetadas pela solicitação excessiva de tráfego e/ou ação de intempéries apresentam danos em formas de macro trincas, depressões, buracos (painéis), entre outros. Esses danos observados em uma escala maior (visível a olho nu) geralmente são resultados da combinação de fenômenos que ocorrem em escalas menores, muitas vezes imperceptíveis a olho nu (micro trincas, interações entre partículas, acomodação dos constituintes do concreto asfáltico). Assim, é importante entender quando e por que os danos em uma menor escala de análise irão iniciar-se e propagar-se.

Para melhor entendimento do comportamento de concretos asfáltico, a maioria dos procedimentos utilizam métodos semi-empíricos ou técnicas fenomenológicas e envolvem ensaios laboratoriais repetitivos e de alto custo. Mais ainda, estes métodos não levam em consideração as características fundamentais do material, especialmente a formação de inúmeras trincas e em diferentes escalas que eventualmente levam o pavimento asfáltico a falência. Dessa forma, se faz necessária à busca por métodos que possam prever de forma mais precisa o comportamento estrutural global de concretos asfálticos, considerando as propriedades fundamentais dos materiais e suas interações em diferentes escalas.

Trincamento por fadiga e deformação permanente são dois dos principais mecanismos que causam manifestações patológicas em pavimentos flexíveis. Estes se iniciam em uma escala menor do concreto asfáltico. Muitas pesquisas têm utilizado apenas a parte fina da mistura asfáltica, denominada Matriz de Agregados Finos (MAF), para análise de tensões e deformações. Estudos da MAF se iniciaram com Kim et al. (2003) e vêm sendo cada vez mais difundidos para se estabelecer critérios de dosagem e ensaios ideais para avaliação de deformação permanente e fratura (CASTELO BRANCO, 2008; KARKI, 2010; COUTINHO, 2012; UNDERWOOD e KIM, 2013).

Assim, o estudo desenvolvido na presente pesquisa apresenta uma análise do desempenho de MAF's, onde são levados em consideração apenas agregados com dimensões máximas inferiores a 2 mm envolvidos por ligante betuminoso. Conhecendo-se a resistência ao dano por fratura e as características da rigidez viscoelástica da parte fina das misturas e o quanto essa parte fina influencia no

comportamento do concreto asfáltico, é possível serem feitas melhores escolhas de materiais e dosagens para obtenção de misturas mais eficientes.

Outra problemática existente está relacionada à geração do grande volume de resíduos na extração e corte de rochas ornamentais. O Brasil é o quarto maior produtor mundial, sendo o estado do Espírito Santo, líder nacional de produção de rochas (ABIROCHAS, 2014). Outra questão é a geração de escória de aciaria, considerando que o Brasil está entre os maiores produtores mundiais de aço bruto (TWI REPORT, 2010). A possibilidade de redução de custos (devido à redução de extração e utilização de agregados naturais) e a minimização do impacto ambiental (ocasionada pela disposição inadequada dos resíduos e exploração excessiva de jazidas minerais) têm levado várias pesquisas a seguirem nessa linha sobre a utilização destes resíduos na construção civil, sendo a sua utilização no setor de pavimentação asfáltica uma alternativa. Devido ao exposto, é abordada nessa pesquisa a influência da adição do Resíduo do Beneficiamento de Rocha Ornamental (RBRO) e da Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler nas misturas asfálticas, nas propriedades viscoelásticas e de fratura da MAF, sendo seu reaproveitamento de fundamental importância para controle e minimização dos problemas ambientais.

Espera-se, com a realização desta pesquisa, contribuir para o estudo do reaproveitamento do RBRO e da EMA e o desenvolvimento de novos métodos de projeto e execução de pavimentos asfálticos, considerando as particularidades dos fenômenos ocorrentes em menores escalas prevenindo, durante o período que o pavimento foi projetado, danos como o trincamento e o excesso de deformações permanentes.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal verificar a potencialidade de uso de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e da escória moída de aciaria (EMA) do tipo LD como fíler na matriz de agregados finos (MAF).

1.1.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Verificar se as características físicas, químicas e mineralógicas dos resíduos utilizados influenciam no desempenho das MAF's, através da realização de ensaios de análise granulométrica, difração de Raios X, e micrografias utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura com Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS);
- Verificar se há alterações significativas na rigidez e elasticidade de MAF's com substituição de resíduos, através da determinação experimental das propriedades viscoelásticas (módulo complexo e ângulo de fase) da matriz de agregados finos obtidas através do ensaio de varredura de frequência (*Frequency Sweep*, FS), de forma a verificar as características da rigidez viscoelástica linear;
- Verificar os efeitos da substituição dos resíduos nas MAF's na suscetibilidade das mesmas à fratura, através da análise de energia de fratura obtidas no ensaio de fratura com geometria semi-circular (*Semi Circular Bending Test*, SCB) e da análise das curvas de dano características obtidas após análise dos resultados oriundos do ensaio de varredura de tempo (*Time Sweep*, TS) sob tensão controlada;
- Verificar correlações entre as características da MAF com matrizes asfálticas produzidas em escalas de análise menores (mástiques) e maiores (mistura asfáltica completa) com relação ao desempenho geral das misturas utilizando os resíduos RBRO e EMA.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 é introdutório, no qual constam a justificativa e relevância do tema abordado, além dos objetivos do estudo.

O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, nacional e internacional, destinada à abordagem de importantes tópicos para entendimento de conceitos e metodologias desenvolvidos na pesquisa, como conceituação e contextualização dos resíduos RBRO e EMA, conceituação e características da MAF, bem como trabalhos desenvolvidos utilizando-a, e por fim, teorias necessárias para o entendimento dos ensaios realizados nas diferentes MAF's para avaliação de seus desempenhos.

O Capítulo 3 trata dos materiais utilizados na composição das MAF's e suas respectivas Misturas Asfálticas Completas (MAC), assim como a obtenção e caracterização dos mesmos. Os ensaios realizados e os resultados obtidos a partir da caracterização dos materiais também encontram-se neste capítulo. Além disso, o capítulo também apresenta os métodos empregados para dosagem e para avaliação do desempenho das MAF's.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios experimentais conduzidos nas MAF's assim como a discussão dos mesmos.

O Capítulo 5 contém as conclusões deste estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITUAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais podem ser conceituadas como materiais geológicos naturais que podem ser extraídas em blocos, e desdobradas e cortadas em forma de chapas ou placas. Podem, ainda, ser submetidas a processos industriais de acabamento. Em relação à classificação comercial, os principais tipos de rochas ornamentais são os granitos e os mármore. Outros tipos de rochas ornamentais são os quartzitos, serpentinos, travertinos e ardósias. Os granitos são rochas silicáticas, com predominância de quartzo e feldspato em sua composição. Os mármore são rochas carbonáticas resultantes do metamorfismo de calcários e dolomitos (IEL, 1996).

Segundo dados da ABIROCHAS (2015), estima-se que a produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento, no ano de 2014, foi de 130 milhões de toneladas, resultando para que este setor esteja, atualmente, movimentando transações comerciais de US\$ 130 bilhões por ano. As previsões são de que no ano de 2020 esta produção mundial ultrapasse 170 milhões de toneladas.

No Brasil, no final da década de 1950, os estados de Minas Gerais e Espírito Santo foram os pioneiros na exploração e extração de mármore, dando início a extração em escala industrial. A produção de rochas graníticas se deu a partir do aprimoramento e surgimento de novas tecnologias, cujas qualidades físicas contribuíram para uma maior participação no mercado. Atualmente, o Brasil está entre os grandes produtores e exportadores mundiais do setor de rochas, sendo o 4º maior produtor de rochas, atrás da China, Índia e Turquia, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Maiores produtores mundiais de rochas

Países	1996		2013		Variação 2013/2012
	1.000 t	Participação	1.000 t	Participação	
China	7.500	16,1%	39.500	30,4%	526,7%
Índia	3.500	7,5%	19.500	15,0%	557,1%
Turquia	900	1,9%	12.000	9,2%	1333,0%
Brasil	1.900	4,1%	9.000	6,9%	473,7%
Itália	8.250	17,7%	7.000	5,4%	84,8%
Iran	2.500	5,4%	6.500	5,0%	260,0%
Espanha	4.250	9,1%	5.000	3,8%	117,6%
Egito	1.000	2,2%	3.000	2,3%	300,0%
EUA	1.350	2,9%	2.750	2,1%	203,7%
Portugal	1.950	4,2%	2.650	2,0%	135,9%
Grécia	1.800	3,9%	1.250	1,0%	89,4%
Arábia Saudita	250	0,5%	1.200	0,9%	480,0%
França	1.150	2,5%	1.050	0,8%	91,3%
Paquistão	200	0,4%	1.000	0,8%	500,0%
Subtotal	36.500	78,5%	111.400	85,7%	305,2%
Outros	10.000	21,5%	18.600	14,3%	186,0%
Total Mundial	46.500	100,0%	130.000	100,0%	279,6%

Fonte: Montani (2014) apud ABIROCHAS (2014).

No ano de 2013, as exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento totalizaram US\$ 1.302,11 milhões, correspondentes a um volume físico comercializado de 2.725.628,78 toneladas (ABIROCHAS, 2014). Entre os tipos de rochas mais produzidas nacionalmente destacam-se Granito e Similares e Mármore e Travertino, compondo 49,5% e 19,0% da produção brasileira, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2 - Perfil da produção brasileira por tipo de rocha - 2013

Tipos de Rocha	Produção (Milhão t)	Participação Percentual
Granito e Similares	5,2	49,5
Mármore e Travertino	2,0	19,0
Ardósia	0,6	5,7
Quartzito Foliado	0,5	4,8
Quartzito Maciço	0,8	7,6
Pedra Miracema	0,2	2,0
Outros (Basalto, Pedra Cariri, Pedra-Sabão, Pedra Morisca, etc.)	1,2	11,4
Total Estimado	10,5	100

Fonte: ABIROCHAS (2014).

No Brasil, o Espírito Santo se destaca pelas atividades de extração de mármore e granito e processamento. O estado constitui 80% do mercado nacional e é

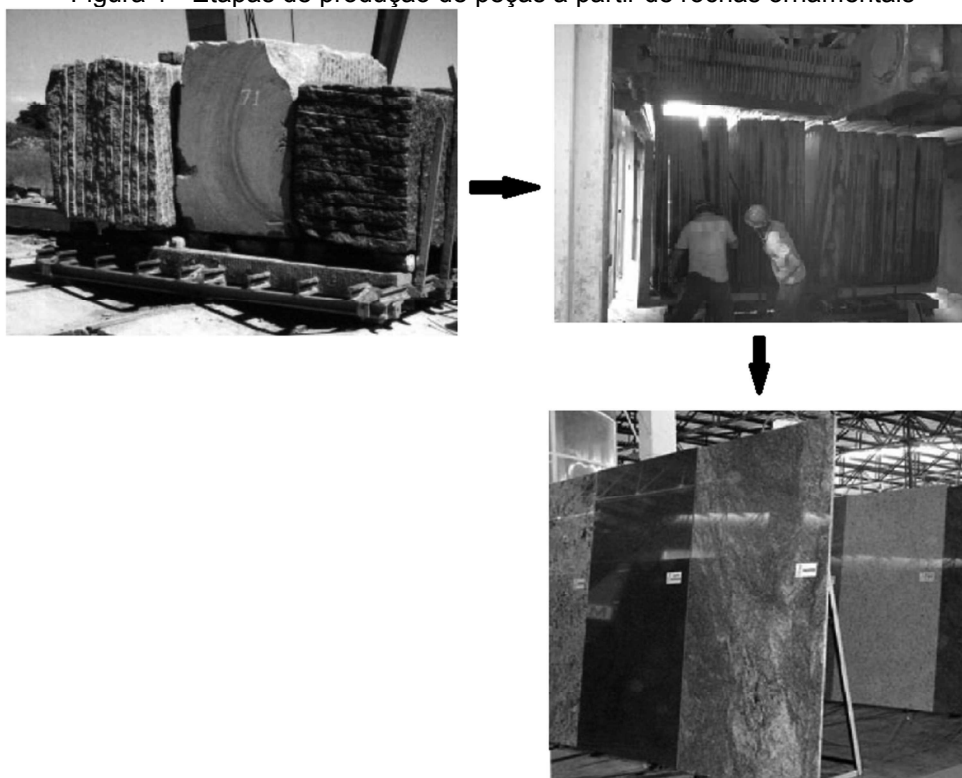
responsável por 78% das exportações. De janeiro a julho de 2013, a produção de rochas ornamentais foi de 4,5 milhões de toneladas, o que corresponde a 50% da produção nacional. As exportações ultrapassaram um milhão de toneladas, que representam 78% das exportações totais. No Estado do Espírito Santo, as vendas para o exterior aumentaram em relação ao ano anterior, movimentando cerca de 580 milhões de dólares, e ainda o estado possui 90 dos 142 teares multifios (tecnologia de ponta utilizada no corte dos blocos rochosos) instalados no Brasil (VITORIA STONE FAIR, 2014).

2.1.1 Resíduo de Beneficiamento das Rochas Ornamentais

O processo produtivo das rochas ornamentais, desde a matéria-prima até o produto final comercializado, pode ser dividido em três etapas (Figura 1). A primeira delas que ocorre nas jazidas, consiste na extração dos maciços rochosos ou matacões, através do método de lavra mais apropriado.

Após a extração dos blocos, estes passarão pelas segunda e terceira etapas, nas quais serão transportados até local apropriado onde se iniciará o processo de beneficiamento das rochas. Este processo pode ser dividido em beneficiamento primário (realizado nas serrarias), que é o desdobramento dos blocos em placas ou chapas, e beneficiamento secundário, correspondente ao corte e acabamento final das peças, que inclui lustro, esquadrejamento e polimento (executados nas marmorarias).

Figura 1 - Etapas de produção de peças a partir de rochas ornamentais



Fonte: Adaptado de SPÍNOLA (2002); ALTOÉ (2013); Vitoria Stone Fair (2012).

O primeiro estágio do beneficiamento dos blocos se dá por meio de máquinas denominadas teares. Nesta etapa as chapas produzidas normalmente tem espessuras de 1 cm, 2 cm e 3 cm, podendo chegar até 6 cm dependendo da utilização do material (CHIOLDI, 1995).

Nesta primeira fase do beneficiamento, em teares tradicionais de lâmina de aço, utiliza-se uma mistura abrasiva para a serragem dos blocos de rochas ornamentais. Também conhecida como lama ou polpa abrasiva, esta mistura consiste basicamente em componente abrasivo (granalha de aço ou ferro fundido para a serragem dos blocos), água, cal (calcário, carbureto de cálcio ou outro substituto) e rocha moída. Esta polpa possui a função de lubrificar e resfriar as lâminas de aço do tear durante a serragem, evitar a oxidação das mesmas, limpar os canais entre as chapas e servir como abrasivo para facilitar o corte (GOLÇALVES, 2000).

A mistura abrasiva é mantida em um circuito fechado, onde é bombeada e espalhada pelo bloco e tear no momento da serragem através de chuveiros, retornando ao tanque de bombeamento depois que se infiltra pelos canais abertos pelas lâminas. Neste circuito é possível alimentar e dosar a mistura, adicionando

água ou descartando uma parcela mais fina da lama, controlando assim a viscosidade da polpa abrasiva (CALMON e SILVA, 2006).

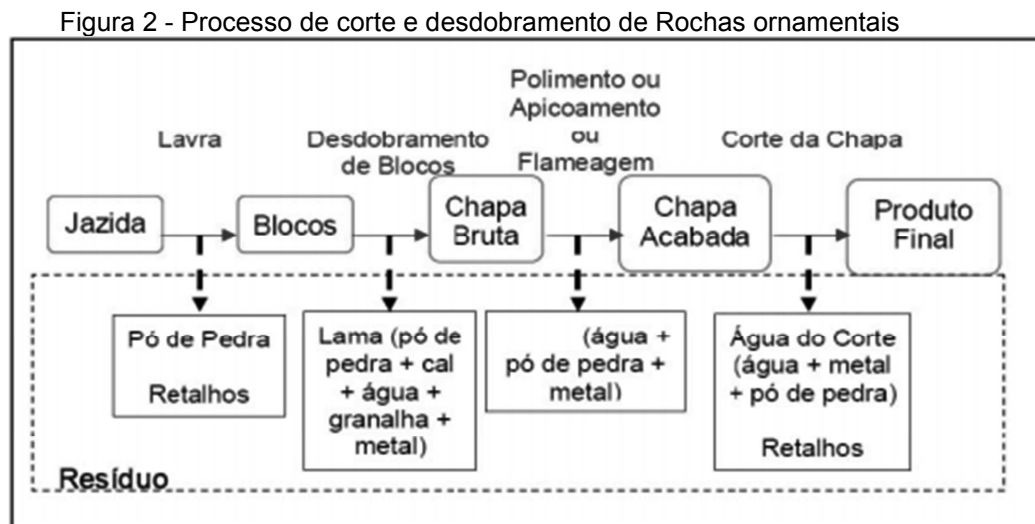
Existem também os teares de fios diamantados, conhecidos como multifios, que se diferenciam dos teares de lâminas de aço por possuírem diamantes industriais afixados. Neste equipamento as lâminas utilizam água para resfriamento, lubrificação e limpeza, não necessitando do emprego da mistura abrasiva e desta forma seu resíduo gerado é considerado de menor impacto ambiental. Porém alguns fatores como, maior custo tanto na aquisição do tear quanto na manutenção e reposição das lâminas, se mostram como limitantes para sua larga utilização no Brasil (ULIANA, 2014).

No segundo estágio do beneficiamento das chapas, uma sequência de operações é realizada para acabamento final das peças, onde grande quantidade de água faz-se necessária para resfriar os elementos abrasivos e eliminar os detritos que são gerados. Os resíduos derivados desta etapa consistem de uma lama de água com pó das rochas, resíduo das lixas de polimento e resina utilizada durante acabamento final.

O processo de desdobramento de blocos de rochas ornamentais, assim como os métodos de lavra geram quantidades significativas de rejeitos, denominados de Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO), que necessitam de tratamento adequado para não comprometer o meio ambiente em que estão inseridos. Apesar do impacto ambiental que essas atividades causam, estas possuem uma grande importância econômica como visto anteriormente.

Durante o processo de desdobramento do bloco de rocha em chapas através de teares, de 20 a 25% do mesmo é transformado em pó (FREIRE E MOTTA, 1995). Gonçalves (2000) menciona que neste mesmo processo, em torno de 25 a 30% do volume do bloco é transformado em resíduo de serragem. De acordo com o autor, somente no Brasil, estima-se que foram geradas 165.000 toneladas por ano de resíduo do corte de granito e mármore, com os estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba os maiores geradores em volume do resíduo.

Na Figura 2 são apresentadas as diversas etapas do processo de corte e desdobramento de rochas ornamentais bem como os resíduos gerados em cada uma das fases.



Fonte: Reis e Alvarez (2007).

- Características físicas, químicas e mineralógicas

Para que seja possível a reutilização dos resíduos do corte de rochas ornamentais é necessário que suas propriedades químicas, físicas e mineralógicas sejam conhecidas para avaliação do desempenho da aplicação em que resíduo foi utilizado. Na Tabela 3 são apresentadas as características químicas encontradas por diferentes autores para de diferentes resíduos de corte de rocha de origem granítica (RCG) e de resíduos de corte de mármore (RCM).

Tabela 3 – Caracterização química do RCG e RCM por diferentes autores

Teor (%)	RCG			RCM	
	Calmon et al. (1997)	Gonçalves (2000)	Moreira et al. (2003)	Almeida et al. (2015)	Queiroz et al. (2014)
SiO ₂	59,95	59,62	65,95	0,9	5,2
Fe ₂ O ₃	6,05	9,49	7,89	-	0,34
Al ₂ O ₃	10,28	12,77	12,84	-	0,4
CaO	6,51	4,83	3,01	52,4	48,5
MgO	3,25	1,96	1,47	9,62	-
K ₂ O	4,48	5,30	4,19	0,58	-
TiO ₂	0,92	---	0,93	-	-
SO ₃	---	0,03	---	0,4	-
Na ₂ O	3,39	2,72	2,39	-	-
Perda ao Fogo	4,74	1,92	1,33	36	-
SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	76,28	81,88	86,68	-	-

Fonte: Cosme (2015).

Da Tabela 3 percebe-se que entre os RCG apresentados não há diferenças significativas na quantidade de seus componentes. A principal diferença que pode ser observada entre os dois tipos de resíduos apresentados é a predominância do quartzo sílica (SiO₂) e o baixo teor de óxido de cálcio (CaO) para o RCG, enquanto que no RCM é observado o inverso.

De acordo com Cosme (2015), a composição e a estrutura dos materiais influenciam na sua capacidade de adesão. O alto teor de sílica comumente encontrado em resíduos do corte de rochas graníticas pode prejudicar na qualidade da adesividade entre os agregados, pois este componente tende a tornar a superfície do agregado mais ácida, interferindo no balanceamento de cargas elétricas com os componentes do asfalto (YOON e TARRER, 1988 apud COSME, 2015).

Agregados com alto teor de sílica (agregados ácidos), como os granitos, possuem grande afinidade com a água, ao contrário dos agregados com baixos teores de sílica, como os basaltos e os calcários, que apresentam melhor adesividade com os asfaltos (ANITELLI, 2013). Ou seja, agregados ácidos (eletronegativos) não possuem afinidade elétrica com ligantes betuminosos, pois estes apresentam caráter eletropositivo, devido ao forte percentual de Carbono presente em sua composição química (LEITE, 2003 apud MEURER et al., 2015).

Com relação às características físicas, Calmon et al. (1997), Gonçalves (2000), Moura et al. (2006) e Uliana (2014) encontraram massa específica de $2,67 \text{ g/cm}^3$, $2,78 \text{ g/cm}^3$, $2,76 \text{ g/cm}^3$ e $2,48 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Com relação ao tamanho das partículas, visando a obtenção do diâmetro das partículas adequadas a granulometria utilizada, Gonçalves (2000) moeu o RBRO de origem granítica obtendo um resíduo com partículas de diâmetro médio de $6,74 \mu\text{m}$. Já Calmon et al. (1997) e Uliana (2014) encontraram grãos com dimensões variando de $0,8$ a $25 \mu\text{m}$, enquanto que Moura et al. (2006) encontrou partículas com diâmetro médio menor que $10 \mu\text{m}$. Como apresentado na Tabela 4 as massas específicas dos resíduos estão em conformidade com as massas específicas dos fileres naturais comumente utilizados em misturas asfálticas, sugerindo então uma possível utilização deste resíduo, de acordo com essa característica.

Tabela 4 – Massas específicas de fileres naturais

MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3)
Cimento Portland	3,030
Calcário	2,749
Cal Cálctica	2,350

Fonte: Pinnila (1965).

Sobre a forma dos grãos, o RBRO de origem granítica investigado por Gonçalves (2000) não apresentou uma forma definida, sendo anguloso, exceto pelos feldspatos que apresentam uma forma lamelar devido ao processo de serragem dos blocos. O mesmo foi observado na análise do RBRO utilizado por Uliana (2014).

Nesse contexto, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para viabilizar a utilização dos resíduos gerados neste processo em variados setores da construção civil, dentre eles o setor de construção de pavimentação asfáltica.

2.2 CONCEITUAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

2.2.1 CONCEITO E FORMAS DE GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

A produção mundial de aço bruto em 2014 totalizou 1,6 bilhão de toneladas e o Brasil foi o nono maior produtor mundial, representando 2,1%, e maior produtor da América Latina (52,2%) (Tabela 5).

Tabela 5 - Produção mundial de aço bruto

Discriminação	Aço Bruto (10 ³ t)		
	2013	2014	%
Países			
Brasil	34163	33912	2,1
China	815361	822700	50,3
Japão	110595	110665	6,8
Estados Unidos da América	86878	88347	5,4
Índia	81299	83208	5,1
Rússia	68856	70651	4,3
Coréia do Sul	66061	71036	4,3
Outros países	355275	356441	21,8
TOTAL	1618488	1636960	100,0

Fonte: WSA, IABr. Sindifer apud DNPM (2015).

Durante a produção do aço, é gerado um tipo de rejeito siderúrgico denominado escória de aciaria, cujas características dependem dos processos de refino. O processo LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnace), representa o processo integral, que se dá pela transformação do ferro gusa líquido (proveniente do processo de redução do minério de ferro), com adição de sucata ferrosa, em aço através de conversores a oxigênio. Durante este processo, com o objetivo de se controlar a percentagem de carbono e de eliminar o excesso de impurezas que podem afetar na qualidade do aço, são adicionados à carga metálica fundentes dos quais os principais são a Cal (CaO) e Fluorita (CaF₂), que serão os responsáveis pela fixação dos óxidos formados, gerando assim escórias do tipo oxidantes.

O segundo processo utiliza fornos elétricos basicamente para fusão de matéria prima reciclável (sucata ferrosa) e em seguida a injeção de oxigênio com o objetivo de oxidar o carbono, silício e fósforo presentes, seguido da desulfuração do aço líquido e da adição de elementos de liga. Este processo é denominado EAF (Electric Arc Furnace) e gera escória do tipo oxidante e também do tipo redutora. O terceiro processo utiliza o forno Siemens-Martin denominado OH (Open-Heart), que basicamente se dá pela adição de sucata metálica, calcário e minério de ferro seguido de injeção oxigênio com o objetivo de provocar a fusão e agitação do banho metálico, gerando escória oxidante.

A escória de aciaria gerada pelos processos mais predominantes no Brasil pode então ser classificada em escória LD e escória de aciaria elétrica. Suas propriedades física, química e mineralógica variam consideravelmente em função do método

utilizado (LD ou EAF), do controle de fabricação do aço e dos procedimentos de processamento da escória após seu resfriamento e estocagem (SOUZA, 2007).

Estima-se que a cada 1.000 Kg de aço produzida, 100 Kg de escória de aciaria são geradas (LITTLE e SETEPLA, 1999; METSOL et al., 2007 apud POLESE, 2007). Isto significa que a escória de aciaria gerada representa 10% do aço total produzido.

- Características físicas, químicas e mineralógicas

Por ser um resíduo originado no processo de refino do aço, a escória de aciaria é constituída por óxidos de cálcio e magnésio, silicatos de cálcio, ferro metálico e outros componentes químicos presentes em menor escala. Nas escórias de aciaria LD, geralmente observa-se uma predominância de óxidos de cálcio, silício e ferro, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química da escória de aciaria produzida pelo processo LD no mundo

Composto	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	P ₂ O ₅
Brasil (%)	6 – 45	1 - 9	7 - 16	1 – 4	8 - 30	3 - 7	-
Austrália (%)	>35	-	<20	<5	<25	-	Traços
China (%)	4,5	-	10,5	2,7	35	-	1,05
Espanha (%)	48	-	16	1,2	16	-	0,5
França (%)	47	-	13	1	25	-	2

Fonte: Adaptado de IBS (1998) apud Castelo Branco (2004); Lima (1999) apud Faria (2007).

Em comparação com a composição química do RBRO, pode-se citar que a escória de aciaria LD apresenta teores de CaO superiores aos comumente encontrados para resíduos provenientes do corte de rochas graníticas. Além disso, apresentam teores de SiO₂ bem inferiores ao do resíduo de corte de rochas ornamentais de origem granítica, o que pode contribuir para um melhor desempenho de misturas asfálticas. Segundo Machado (2000) apud Faria (2007), no final do processo de produção do aço, depois que o fósforo e silício oxidam, parte da cal (CaO) e do magnésio (MgO) precipitam pois ultrapassam os limites de solubilidade da escória fundida, justificando os altos teores encontrados destes componentes na escória.

De acordo com Proctor et al. (2002) apud Souza (2007), as partículas de escória de aciaria possuem forma acentuadamente angular e textura superficial grosseira

contribuindo para seu intertravamento. Além disso, apresentam massa específica mais elevada que a dos agregados naturais e um moderado índice de absorção de água. Apresentam também maior suscetibilidade a retenção de água devido a maior porosidade dos grãos quando comparadas aos agregados naturais, que aliada a presença de óxidos hidratáveis (CaO e MgO) provoca instabilidade volumétrica.

Conforme mencionado, o CaO e MgO livres são os principais responsáveis pela instabilidade volumétrica da escória, pois o CaO hidrata-se rapidamente, causando mudanças no volume dos grãos em pequeno período de tempo e o MgO hidrata-se mais lentamente, podendo levar anos para sua estabilização. Consequentemente, a expansibilidade das partículas da escória de aciaria provocam a desintegração dos agregados e, portanto a diminuição da resistência.

Dessa forma, observa-se que as escórias de aciaria podem ter variações consideráveis na sua composição química, mineralógica e física devido a variações ocorridas nos processos de refino do aço, da forma de resfriamento da escória (que será abordada mais adiante) e da sua armazenagem após resfriamento (SOUZA, 2007). Portanto, para a utilização da escória é aconselhável que seja feita a análise de suas características levando em consideração a origem dessa escória e as variáveis de processo na aciaria.

O processo de beneficiamento da escória de aciaria consiste em resfriá-la e processá-la em uma planta de britagem apropriada, separando-se a fração metálica e classificando-se a escória em faixas granulométricas comerciais. Contudo, a escória de aciaria ainda enfrenta alguns obstáculos para sua utilização, devido principalmente a sua natureza expansiva e a insuficiência de critérios técnicos para determinar sua estabilização, gerando problemas relativos ao seu desempenho e durabilidade.

Além do CaO e do MgO já citados, a presença de ferro metálico também gera expansão, normalmente com um efeito relativamente menor se comparado ao do óxido de cálcio e magnésio (ALEXANDRE et al., 1993; GEISELER e SCHLOSSER, 1988; MOTZ e GEISELER, 1998; GUMIERI et al., 2000; MACHADO, 2000; SAHAY et al., 2000; ÂNGULO et al., 2001 apud POLESE, 2007). Esta expansão ocorre por reações de oxidação do Fe^0 , formando compostos como a wustita (FeO), hematita

(Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), e reações de corrosão, formando compostos como o hidróxido ferroso [$\text{Fe}(\text{OH})_2$], goethita [$\text{FeO}(\text{OH})$] e hidróxido férrico [$4\text{Fe}(\text{OH})_3$]. Com o aumento volumétrico das partículas, geram-se tensões internas que levam ao surgimento de trincas.

No entanto este fenômeno de expansibilidade pode ser reduzido utilizando-se de métodos de cura, que nada mais é do que a reação normal ou forçada da escória de aciaria com ar, água ou vapor de água, de forma a promover sua expansão, ou seja, a reação das substâncias instáveis presentes, transformando-se em hidróxidos e carbonatos estáveis, antes de sua aplicação final. Este processo pode ser realizado de forma lenta ou normal estocando em pilhas, dispostas em pátios a céu aberto submetendo a escória ao contato com água, por um período de três meses a um ano, que varia em função da composição química da escória (MACHADO, 2000 apud CASTELO BRANCO, 2004)

Com o objetivo de acelerar a estabilização volumétrica da escória de aciaria LD e assim reduzir sua capacidade de expansão, um processo para obtenção da cura acelerada foi desenvolvido pela empresa Arcelor Mittal, obtendo-se uma escória chamada ACERITA® - Escória de Aciaria com Redução de Expansão. Este processo consiste da utilização da umectação e aeração periódicas, propiciando a aceleração das reações de hidratação dos óxidos CaO e MgO livres constituintes da escória, através do contato com o ar e a água, para a obtenção de escórias que se enquadrem nos limites de expansão volumétrica definidos pelas normas de pavimentação do DNIT. A utilização da escória de aciaria LD do tipo ACERITA® em camadas de sub-base de pavimentação rodoviária, deve seguir as especificações estabelecidas na norma do DNIT 114/2009 – ES.

2.3 CONCRETO ASFÁLTICO

2.3.1 Definição

De acordo com a norma do DNIT 031/2006 – ES, o Concreto Asfáltico (CA) também conhecido como Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) pode ser definido como uma mistura asfáltica executada a quente em usina apropriada, composta de

agregados minerais graduados, Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e material de enchimento (fíler) se necessário, espalhada e compactada a quente.

O revestimento asfáltico de um pavimento novo, até um determinado volume de tráfego, geralmente consiste de uma única camada de mistura asfáltica. Ao superar 70 mm de espessura, o projeto de revestimento costuma subdividir a execução em duas camadas, onde cada uma possui características específicas de acordo com a sua função. A camada superior, que fica em contato com os pneus dos veículos recebendo diretamente a ação do tráfego, é chamada de camada de rolamento ou “capa asfáltica”, devendo ser projetada para garantir flexibilidade e estabilidade conferindo segurança aos usuários. A camada inferior é denominada camada de ligação (*binder*) apresentando como maiores diferenças a utilização de agregados de maior diâmetro máximo e existência de maior percentagem de vazios e assim um menor consumo de ligante (BERNUCCI et al., 2008).

Conforme apresentado por Lucena (2009), as misturas asfálticas são projetadas para: resistirem às deformações permanentes; resistirem a fissuração por fadiga e por variação térmica; possuírem uma adequada adesividade agregado-mástique para que não ocorra a desagregação; apresentarem boas condições de trabalhabilidade durante todo seu ciclo de produção, serem duráveis para resistirem ao desgaste do tráfego e as intempéries, serem impermeáveis para proteger as camadas inferiores, possuírem adequada textura superficial, não causarem um ruído entre o pneu e o pavimento inadequado, possibilitarem a obtenção de uma superfície regular, permitirem facilidade na manutenção e serem de utilização economicamente vantajosa.

2.3.2 Importância do Fíler para as Misturas Asfálticas

Fíler (derivada da palavra em inglês “*to fill*” = preencher) ou material de enchimento constitui um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de Nº 200 (0,075 mm de abertura de malha quadrada), provenientes tanto dos agregados utilizados na mistura asfáltica como também de outras fontes, como pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, entre outros (DNER – EM 367/97).

Santana (1995) apud Bardini et al. (2010) define fíler como sendo um material constituído de partículas finamente divididas provenientes da moagem dos agregados miúdos e britagem de rochas minerais empregados na mistura asfáltica, com a finalidade de melhorar o desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que obedecidos os limites especificados.

O tipo e o teor do fíler utilizado nas misturas asfálticas influenciam diretamente na sua durabilidade. Segundo Kavussie Hicks (1997) apud Cavalcante (2001), as propriedades mecânicas e reológicas das misturas asfálticas estão relacionadas com as propriedades físicas e químicas do material de enchimento utilizado, como por exemplo, o tipo de fíler (graduação, forma dos grãos, etc.), a sua natureza e concentração.

De acordo com Pinilla (1965), o fíler preenche os vazios entre os agregados graúdos e miúdos nas misturas, ajudando a formar o esqueleto mineral (fíler agregado) e altera as propriedades dos ligantes asfálticos, aumentando a sua viscosidade e assim a sua resistência a deformação (fíler ativo).

A função que o fíler desempenha nas misturas está relacionada diretamente com a sua granulometria. As partículas maiores que 40 µm costumam preencher os vazios entre os agregados e as partículas menores que 20 µm misturam-se com o ligante, constituindo o mástique asfáltico, contribuindo para o aumento da sua viscosidade e seu ponto de amolecimento e diminuindo a sua suscetibilidade térmica (MOTTA e LEITE, 2000).

A graduação e porcentagem de fíler afetam a trabalhabilidade da mistura asfáltica. Ao aumentar a sua porcentagem, os vazios do esqueleto mineral irão reduzir e a trabalhabilidade irá aumentar até que passado um determinado teor de fíler utilizado, este irá prejudicar a consistência e estabilidade do esqueleto mineral, além de modificar os esforços de compactação necessários (GOUVEIA, 2013).

Cavalcante (2001) estudou sobre o efeito de diferentes teores de fíleres (2% e 5%) e de seis diferentes tipos de fíleres (areia de campo, pó de pedra, cimento Portland, carbonato de magnésio e cal hidratada) nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A autora observou que o volume de vazios não necessariamente diminui

com o aumento do teor do fíler. Encontrou que misturas com o mesmo teor de fíler, mas com diferentes tipos de fíler, podem ser considerados com o mesmo teor de projeto de ligante. Em relação aos valores obtidos na resistência a tração estática, estes aumentaram com o aumento do teor de todos os tipos de fíleres analisados nas misturas asfálticas, com destaque para as misturas utilizando fíleres de pó calcário e cal hidratada, nas quais os valores de resistência à tração estática aumentaram, em aproximadamente, duas vezes.

Leite e Motta (2002) avaliaram parâmetros reológicos dos mástiques resultantes das misturas de três diferentes fíleres com CAP 20 e CAP 40, analisando a importância do teor, tipo e da granulometria do fíler. As autoras mostraram que independente do tipo de fíler sempre ocorre o enrijecimento dos mástiques e assim um cuidado deve ser tomado com o excesso da fração fina do fíler, pois essa característica pode ser prejudicial ao pavimento. Ao final, sugerem estudos de caracterização de fíleres, bem como a definição de limites mínimos e máximos da fina fração do fíler em misturas betuminosas.

Bardini et al. (2012) estudaram a influência do teor ($f/a = 0,0; 0,6$ e $0,9$) de quatro diferentes tipos de fíleres (Calcário, Cal Cálctica, Cimento Portland e Sílica) em dois tipos de ligante asfáltico (CAP50/70 e CAP 85/100) analisando o comportamento do mástique asfáltico através da caracterização de suas propriedades reológicas. Os autores concluíram a partir dos resultados dos ensaios que a adição de fíler aumenta o módulo complexo (G^*) e reduz os valores do ângulo de fase (δ), tornando o ligante asfáltico mais rígido e elástico. Também encontraram que quanto maior o teor de fíler utilizado maior o aumento do valor da rigidez à fluência na flexão [$S(t)$], podendo prejudicar o pavimento quanto ao trincamento a baixas temperaturas, principalmente o fíler de cal hidrata, que é o que mais aumenta a rigidez do mástique, em ambos ligantes utilizados. Através da análise de variância os autores concluíram que os fatores que mais influenciam G^* são a frequência de carregamento, o tipo de ligante e o teor de fíler, enquanto que o tipo de fíler tem influência apenas quando se considera a cal hidratada devido a sua grande atividade.

2.3.3 Utilização de RBRO e EMA como fíler em misturas asfálticas

Devido a questões ambientais, intensificaram-se as buscas por alternativas para o reaproveitamento de resíduos e de materiais que, até então, seriam rejeitados. Dentre os grandes geradores de resíduos está o setor da construção civil. Uma solução para a minimização do impacto ambiental é a adoção de uma política de incentivo para a utilização desses resíduos na cadeia produtiva onde, consequentemente, reduzirá a extração de recursos naturais.

Os materiais reutilizados devem agregar aos produtos propriedades mecânicas, físicas e químicas similares àquelas obtidas quando utilizados os materiais convencionais. Uma das linhas de utilização dos resíduos industriais é a pavimentação.

O pavimento asfáltico consiste em grandes quantidades de agregados e fíleres minerais para produzir uma estrutura resistente e durável. Apesar dos fíleres serem utilizados em menores proporções, estes desempenham importantes propriedades na mistura asfáltica como visto anteriormente. Diversas pesquisas sobre a utilização de resíduos em misturas asfálticas vêm sendo feitas, como a utilização da escória (CASTELO BRANCO, 2004), do resíduo de gesso (FREITAS, 2010), borracha moída de pneus (MUGAYAR et al., 2009), resíduos de caulim (LUCENA, 2009), resíduo da areia de fundição (BONET, 2002), lodo de esgoto (MARTINEZ, 2014), cascalho de perfuração de poços de petróleo (LUCENA, 2008) e resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais (SOUZA et al., 1998), que será o tipo de resíduo utilizado nesta pesquisa.

Fernandes (2007) estudou sobre a utilização de resíduo proveniente de serragem de rocha granítica como substituição aos fíleres convencionais analisando a suscetibilidade de misturas asfálticas à ação de água. O autor obteve resultados crescentes para a estabilidade Marshall, que se deu até um percentual de 5%, e decresceu para os percentuais de 6% e 7%, mas manteve-se com valores de estabilidade superiores ao estabelecido pelo DNIT, mesmo quando submetidos à imersão em água. Os resultados obtidos da Relação da Resistência à Tração (RRT) se mantiveram acima do valor mínimo de 70% somente para o percentual de fíler de 5%.

Souza et al. (1998) utilizaram resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como fíler (5%) em CA's usinados a quente e comparou com misturas utilizando cal e cimento Portland como fíleres. Também analisou os efeitos da variabilidade do teor de fíler do resíduo de serragem de rochas graníticas em 4%, 6% e 7%. Encontraram que a mistura asfáltica composta com fíler do resíduo apresentou valores de estabilidade (aproximadamente 575 Kgf) de acordo com o especificado em norma, enquanto que a mistura contendo o fíler de Cimento Portland apresentou valores de estabilidade inferiores. Já as misturas que utilizaram como fíler a cal apresentaram valores maiores de Estabilidade Marshall (700 Kgf) se comparadas com as outras misturas estudadas. Os autores concluíram que as misturas contendo resíduos das rochas graníticas em substituição aos fíleres convencionais na proporção de 6%, satisfazem os requisitos mínimos necessários para aplicação em CA, para um teor de 5,5% de cimento asfáltico.

Karalahin e Terzi (2007) estudaram sobre a utilização do resíduo de mármore como fíler em misturas asfálticas e compararam com os resultados obtidos para amostras utilizando pó calcário como fíler nas misturas. Os resultados dos testes mostraram que as amostras com resíduo de mármore e pó calcário possuem deformações plásticas similares, sendo que as misturas asfálticas contendo resíduo de mármore apresentaram levemente maior deformação plástica, portanto sendo recomendadas para estradas com baixo volume de tráfego assim como estradas locais.

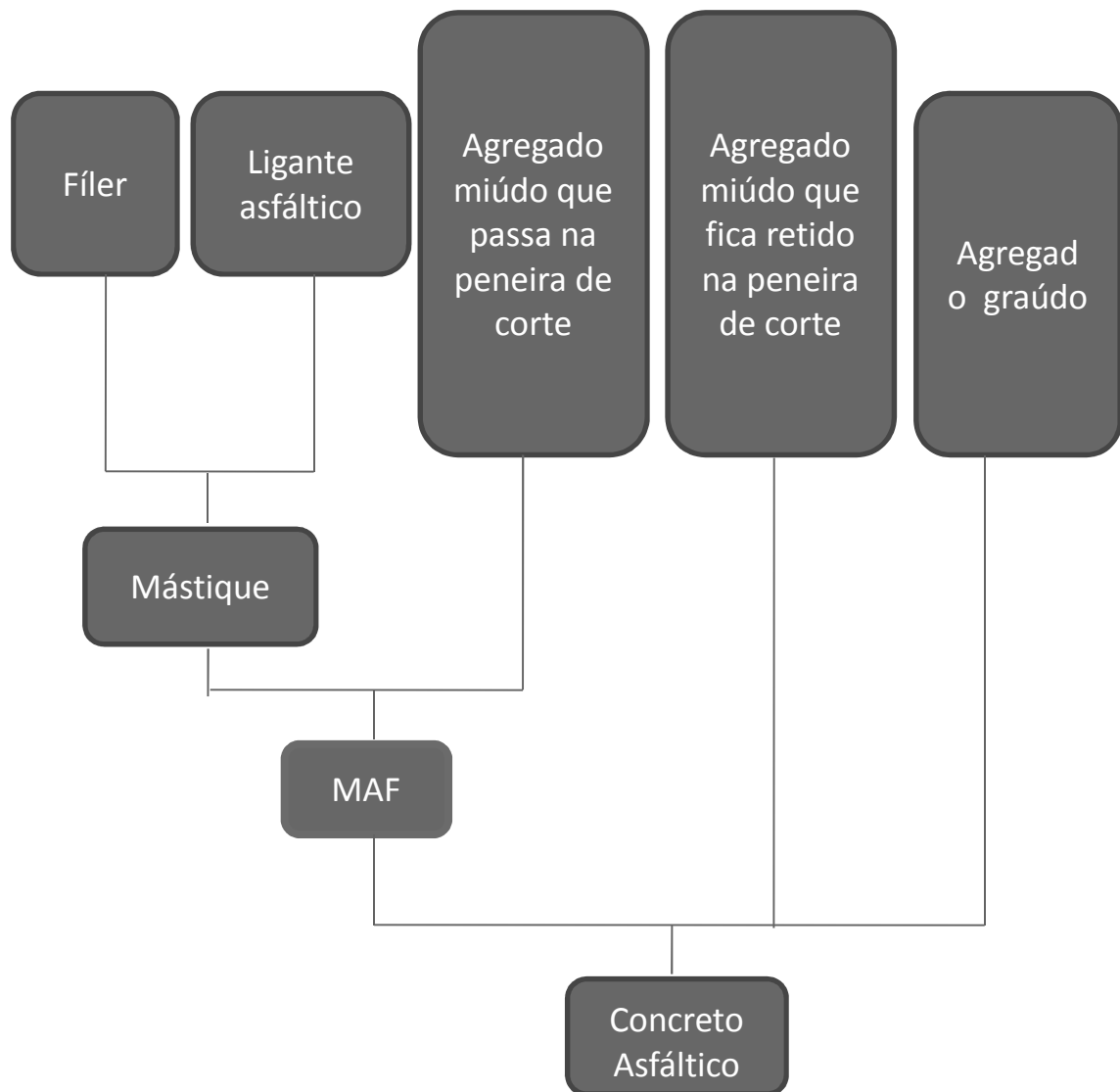
Gottardi (2015) avaliou as propriedades volumétricas e o comportamento mecânico dos concretos asfálticos com substituição como fíler dos resíduos RBRO e EMA, nas percentagens de 2%, 3% e 4%. No geral, a substituição dos resíduos proporcionou um menor consumo de ligante asfáltico (redução de até 5,83%) e proporcionou misturas que atendessem as especificações vigentes do DNIT. Para o ensaio de estabilidade e fluência encontrou que os concretos asfálticos com substituição de ambos resíduos (RBRO+EMA) obtiveram melhor desempenho, pois apresentaram maior resistência máxima suportada (máximo de 11,76% a mais que a mistura de referência) com menores variações de deformações. O autor concluiu que a utilização destes resíduos industriais em concreto asfáltico gera alterações positivas nas propriedades mecânicas abordadas e, portanto é uma potencial alternativa para sua destinação.

Com o objetivo de fazer a avaliação reológica, em uma menor escala, da adição dos resíduos RBRO e EMA em misturas asfálticas, Cosme (2015) analisou o desempenho dos mástiques com estes resíduos, realizando ensaios de RTFOT, PAV, Viscosímetro *Brookfield*, varredura de frequência, varredura de deformação e o ensaio oscilatório de fluência e recuperação. Fixando o teor de ligante e variando a percentagem de fíler adicionado, o autor avaliou a influência destes resíduos nos teores fíler/betume de 0,36, 0,54 e 0,72 e comparou com o desempenho do ligante puro (CAP 50/70). Concluiu-se, no geral, que a utilização dos resíduos melhorou o comportamento reológico do CAP, onde o resíduo de EMA proporcionou um aumento da rigidez e apresentou uma maior elasticidade quando comparado ao ligante puro ou ao mástique com RBRO, contribuindo para um ligante menos suscetível à deformação permanente e à fadiga. Fazendo uma análise dos resultados para a relação $f/b=0,36$, observou-se para mástiques com adição de RBRO+EMA (50% de cada resíduo), melhores resultados de recuperação (R) e compilâncias não-recuperáveis (Jnr), concluindo-se que este mástique apresenta menor suscetibilidade a deformação permanente e maior recuperação elástica. Estes resultados corroboram com o resultado obtido para o G^* , visto que, o mástique RBRO+EMA apresentou maior rigidez.

2.4 PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CA ATRAVÉS DO ESTUDO DA MATRIZ DE AGREGADOS FINOS

A Matriz de Finos Asfáltica também conhecida como Matriz de Agregados Finos (MAF) e em inglês *Fine Aggregates Matrix* (FAM) é composta por agregados miúdos, fíler e ligante asfáltico, representando, portanto, a parte fina do concreto asfáltico (CA), a qual possui adicionalmente os agregados graúdos. O organograma apresentado na Figura 3 mostra os componentes comumente empregados em cada fase presente no CA.

Figura 3—Organograma dos componentes do concreto asfáltico



Fonte: Acervo pessoal.

De acordo com Coutinho (2012), o estudo da MAF é utilizado como um passo intermediário para prever o comportamento de misturas asfálticas completas, devido ao indício de que o dano por fadiga se inicia na parte fina da mistura. Isso possibilita um maior conhecimento sobre o quanto a parte fina da mistura interfere no comportamento do CA e assim melhores escolhas de materiais e dosagens podem ser feitas, proporcionando maiores resistências à fadiga.

Outro motivo para o emprego de MAF se deve ao fato de que essa matriz possui estrutura interna mais uniforme que o CA e assim os ensaios que são executados apresentam menores variações dos resultados para amostras de uma mistura

asfáltica. Ainda apresenta como vantagem uma economia do consumo de materiais para produção dos corpos-de-prova já que as amostras de MAF possuem dimensões reduzidas quando comparadas com as do CA (aproximadamente 12 mm de diâmetro e 50 mm de altura para os cilindros de MAF e aproximadamente 100 mm de diâmetro e de 35 a 150 mm de altura para cilindros de CA).

O estudo da MAF, por ser ainda relativamente recente, não possui especificações técnicas normatizadas como metodologia de dosagem, volume de vazios a ser considerado, tamanho máximo do agregado utilizado, metodologia de moldagem e compactação e parâmetros de controle de ensaios experimentais para gerar MAF's que representem as características da parte fina da mistura completa do concreto asfáltico. Com relação ao tamanho máximo do agregado miúdo a ser utilizado na MAF a maioria dos autores utiliza a peneira #16 (1,18 mm) como limite superior (KIM et al., 2003; ZOLLINGER, 2005; CASTELO BRANCO, 2008; ARAGÃO, 2011; VASCONCELOS et al., 2011; UNDERWOOD e KIM, 2013; NABIZADEH, 2015). Porém, como no Brasil a peneira #16 não faz parte da série de peneiras normatizadas, alguns trabalhos adotaram a peneira #10 (2,00 mm) para limitar o tamanho máximo do agregado miúdo (COUTINHO, 2012; FREIRE, 2015).

Dessa forma diversos estudos têm sido realizados para o desenvolvimento destas especificações metodológicas utilizando a MAF com o objetivo de determinar o comportamento de suas respectivas misturas asfálticas completas (KARKI, 2010; IZADI et al., 2011; LUTIF, 2011; ARAGÃO et al., 2014; UNDERWOOD e KIM, 2013; FREIRE, 2015; Li et al., 2015).

2.4.1 Métodos de dosagem e fabricação de MAF's

Não há um consenso na literatura sobre o método de dosagem e fabricação de MAF's, bem como qual seria o tamanho nominal máximo dos agregados presentes e o percentual de vazios a ser utilizado na análise. Para a obtenção do teor de ligante, alguns autores simplesmente fixam o teor de ligante da MAF sem correlacionar com o teor de ligante da mistura asfáltica completa (KIM et al., 2003; ZOLLINGER, 2005; IM, 2012). Outros autores levam em consideração as características individuais dos agregados e distribuição granulométrica utilizada e através de equações determinam o teor de ligante da MAF (KARKI, 2014). Outros propõem a determinação do teor de

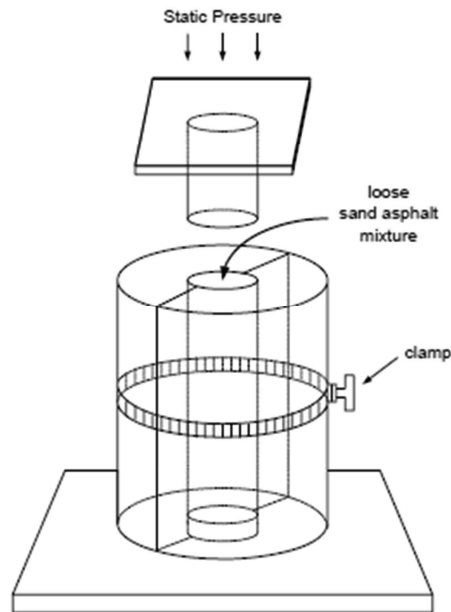
ligante da MAF a partir da dosagem da mistura asfáltica completa, fazendo a separação das fases experimentalmente para a estimativa do teor de ligante (CASTELO BANCO, 2008; SOUSA, 2010; COUTINHO, 2012; FREIRE, 2015; NABIZADEH, 2015).

Em geral, a geometria do corpo-de-prova de MAF's ensaiadas em reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*, DSR) são cilíndricas, com diâmetro de 12mm e altura de 50mm. Estas amostras podem ser obtidas após extração de corpos-de-prova com geometria convencional, obtidos após moldagem em compactadores mecânicos tipo Marshall ou SUPERPAVE; Ou ainda, pode-se obter amostras utilizando compactadores específicos para a geometria desejada.

A seguir, é feita uma revisão de literatura em pesquisas que utilizaram MAF para avaliação de desempenho de misturas asfálticas, focando a análise no tipo de metodologia utilizada para fabricação e dosagem das MAF's.

Kim et al. (2003) foram os pioneiros ao propor a utilização das MAF's, nas quais realizaram a caracterização do dano por fadiga e regeneração de trincas (*healing*). Os autores consideraram arbitrariamente um percentual fixo de ligante asfáltico de 8% para fornecer uma espessura de filme de ligante de aproximadamente 10 μm . Para a moldagem e compactação das MAF's foi utilizado o molde esquematizado na Figura 4, onde os corpos-de-prova eram preparados individualmente e a compactação era feita manualmente por aplicação de pressão estática. O interior do molde foi fabricado com intuito de se obter uma superfície lisa. Segundo Kim e Little (2005) este é um importante fator na minimização de comportamentos aleatórios com relação à iniciação e propagação do trincamento por fadiga, permitindo a repetibilidade dos testes. As amostras obtidas possuíam aproximadamente 11,5 g de massa, 17% de volume de vazios e tinham como dimensões 50 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. A partir de então, outros autores começaram a empregar o uso de MAF's em suas pesquisas.

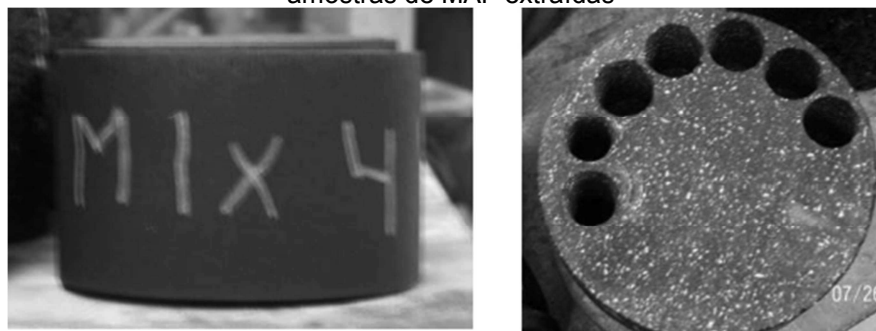
Figura 4 - Molde para fabricação de MAF's



Fonte: Kim (2003).

Zollinger (2005) analisou a suscetibilidade ao dano por umidade de MAF's por meio de um reômetro de cisalhamento dinâmico. Em seu estudo foram realizados ensaios a deformação controlada de 0,0065% e frequência de 10 Hz, para obtenção de propriedades viscoelásticas lineares. Para a análise da resistência ao trincamento por fadiga, realizaram-se ensaios a deformação controlada de 0,2% e 0,3%. Com relação ao procedimento de fabricação das amostras de MAF, o autor desenvolveu um método diferente do utilizado por Kim et al. (2003), onde as amostras de MAF foram extraídas de um corpo de prova com 152 mm de diâmetro, moldados no compactador giratório SUPERPAVE, como ilustrado na Figura 5. Segundo o autor, este procedimento permite maior controle dos vazios das amostras e necessita de menor tempo, porém há um maior gasto de material. O autor utilizou agregados passando na peneira no. 16 (1,18mm) na composição das MAF's e seguiu a metodologia proposta por Kim (2003) utilizando 8% de ligante asfáltico, porém com um volume de vazios de 11%.

Figura 5—(a) Corpo-de-prova obtido no compactador giratório Superpave (b) Corpo-de-prova com as amostras de MAF extraídas



Fonte: Adaptado de Zollinger (2005).

Castelo Branco (2008) estudou sobre a resistência ao trincamento por fadiga de MAF's influenciada por diferentes formas de carregamento (tensão ou deformação controladas) usando um reômetro de cisalhamento dinâmico. Para estimar o percentual de ligante asfáltico presente na MAF, a autora propôs um novo método em que era necessário identificar a massa de agregados presentes na MAC (massa de cada uma das frações da série de peneiras) e gerar a curva granulométrica da MAF mantendo-se as mesmas proporções de cada agregado passante na peneira no. 16. Para exemplificação do método, considera-se que a massa total da MAC era 4.500 g, dos 4.500 g, 1.260,07 g correspondia a massa de agregados passando na peneira no. 16 e o teor de ligante da MAC era 5,4%. A massa de ligante da MAC (243 g) era considerada a mesma presente na MAF e assim o percentual de ligante na MAF era obtido dividindo-se a massa de ligante (243 g) pela massa total da MAF ($1.260,07 + 243 = 1.503,07$ g), obtendo-se 16,17% de ligante. A quantidade de ligante absorvido pelos agregados graúdos pode ser subtraída do total, se for possível a obtenção desta informação. Para a fabricação e moldagem das MAF's foi utilizado o mesmo processo desenvolvido por Zollinger (2005) e foi considerado um volume de vazios de $4 \pm 1\%$.

Sousa (2010) desenvolveu em seu estudo um software para análise dos dados obtidos com testes realizados nas MAF's. O autor ainda desenvolveu uma nova metodologia de dosagem para MAF's que fosse capaz de encontrar, de forma mais representativa, o teor de ligante presente na parte fina da mistura asfáltica completa. No método proposto a proporcionalidade dos agregados finos que compõem a MAF é mantida igual aquela encontrada para a curva granulométrica da MAC. Uma série de especificações é estabelecida para a obtenção das determinações de massas do material mencionadas a seguir. Uma mistura solta da MAC é preparada e a parte

fina da mistura é separada da parte graúda e sua massa anotada. Em seguida a parte fina é colocada em uma estufa de ignição para retirada do ligante e posteriormente sua massa é anotada. O teor de ligante presente na MAF se dá pela divisão entre a massa de ligante presente somente na parte fina da mistura e a massa total (agregado mais ligante) da MAF. Foram utilizados agregados passantes na peneira no. 16 onde as amostras de MAF foram obtidas a partir de sua extração do corpo de prova gerado no compactador giratório SUPERPAVE, nos quais a compactação foi realizada até que não ocorresse mais variação na altura do CP.

Im (2012) analisou importantes características mecânicas como a viscosidade linear, a viscosidade não linear e propriedades de fratura de materiais asfálticos em duas escalas diferentes, a do concreto asfáltico e a da matriz de agregados finos. A produção dos corpos-de-prova de MAF foi conduzida de forma a se obter somente agregados passando na peneira no. 16, utilizando também o compactador giratório SUPERPAVE e em seguida era feita a extração das amostras. O percentual de ligante utilizado foi assumido como 8% em relação ao peso total dos agregados miúdos e foi fixado um volume de vazios de 4%. O autor concluiu que os resultados encontrados utilizando as amostras de MAF forneceram uma estimativa razoável com relação aos resultados encontrados no CA. Dessa forma, o estudo da MAF pôde ser utilizado para previsão das características mecânicas do CA.

Coutinho (2012) avaliou o dano por fadiga da parte fina de misturas asfálticas. O autor propôs um novo método de dosagem de MAF's para que estas representassem de maneira realística a parte fina de seus CA's, baseado na extração de ligante da parte fina e graúda de uma amostra solta da MAC, mantendo-se a proporcionalidade de ligante presente em cada uma das duas fases e adicionalmente considerando os agregados miúdos que ficam envolvendo os agregados graúdos, sendo possível estimar o percentual de ligante presente na MAF. A caracterização do dano por fadiga em MAF's ocorreu através de um método tradicional (varredura de tempo) e de um novo método adaptado (varredura linear de amplitude de deformação e o conceito de dano contínuo em meio viscoelástico), que pode ser realizado em poucos minutos, ao contrário do método tradicional que pode exigir horas. Observou nos resultados que o método adaptado apresentou resultados semelhantes ao tradicional. Por fim, concluiu que a caracterização de

MAF's pode ser utilizada como passo intermediário para previsão do comportamento do dano por fadiga de concretos asfálticos.

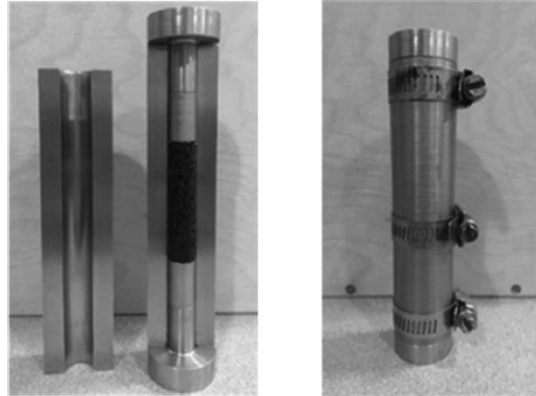
Underwood e Kim (2013) analisaram o efeito de variações volumétricas, como o volume de vazios, teor de ligante e tamanho máximo dos agregados, na rigidez e dano por fadiga da MAF. Para as misturas asfálticas completas que tinham como tamanho máximo do agregado 9,5 mm foram produzidas MAF's correspondentes como tamanho máximo de agregados de 0,6 mm, e para as MAC's de 19 mm, produziram MAF's de 1,18 mm. O teor de ligante utilizado variou de 8,27 a 16,5% enquanto que o volume de vazios variou de 1,7 a 21,0%. A metodologia de fabricação das amostras foi a mesma desenvolvida por Zollinger (2005). Foi concluído que a utilização de MAF's para modelagens ou análises quantitativas requer precisa replicação de MAF's correspondentes as suas MAC's. No entanto, para casos de comparações simples ou estudos qualitativos não é necessária uma reprodução de MAF's tão precisa.

Recentemente, Freire (2015) estudou sobre a influência na resistência ao dano ao variar o tamanho máximo do agregado utilizado na MAF. Para isto, testes de varredura linear de amplitude e varredura de tempo à tensão e deformação controladas de carregamento foram conduzidas nas amostras, onde os resultados foram analisados através da metodologia simplificada do dano viscoelástico contínuo (S-VECD). O tamanho máximo de agregados analisados foram 4,00mm, 2,00mm e 1,18 mm e todas as amostras foram preparadas para terem 4% de volume de vazios. O autor utilizou a metodologia de dosagem proposta por Coutinho (2012) para as MAF's e a obtenção das amostras se deu através da sua extração do corpo-de-prova moldado no compactador giratório SUPERPAVE. O autor pôde concluir através resultados encontrados utilizando a metodologia S-VECD, que as curvas CxS geradas são independentes do modo de carregamento e que a caracterização do dano em MAF pode ser feito utilizando essa metodologia. O autor também concluiu que o tamanho máximo nominal dos agregados tem impacto no desempenho em relação ao dano de cada mistura, já que as curvas CxS obtidas diferem uma da outra.

Nabizadeh (2015) investigou características como a viscoelasticidade, o dano por fadiga e a deformação permanente em misturas contendo 65% de Reciclado de

Pavimento Asfáltico (RPA) e diferentes tipos de rejuvenescedores, realizando ensaios oscilatórios em amostras de MAF e ainda fazendo a correlação do desempenho do concreto asfáltico (CA) e da sua correspondente MAF. Como o RPA já possui ligante assim como agregados, a porcentagem de ligante no RPA precisa ser determinada para sua utilização na dosagem de MAF's. Para isso, foram eliminadas da graduação do RPA partículas maiores que 1,18 mm. O teor de ligante encontrado para o RPA (apenas para o material passando na peneira no. 16) através de ensaios de ignição foi de 9,34% baseado no peso do RPA. A MAF consistia em 65% de RPA e 35% de agregados virgens todos passantes na peneira #16. A quantidade de ligante que deveria ser adicionada para os agregados virgens era a mesma encontrada para o RPA (9,34%), mantendo-se as proporcionalidades. Semelhante ao desenvolvido por Kim et al. (2003), o autor moldou suas amostras individualmente em um molde fabricado especificamente para este propósito e a compactação se deu manualmente por pressão estática. Porém este molde (ilustrado na Figura 6) se diferencia do anterior, pois a pressão é aplicada nas duas extremidades da amostra, compactando a amostra de forma mais homogênea. O molde utilizado nesta pesquisa foi reproduzido com base neste utilizado por Nabizadeh (2015). O autor concluiu que o estudo da MAF é eficiente e simples, possibilitando a redução de custo e tempo, se comparado com os testes que são realizados no CA. Ainda concluiu que os rejuvenescedores modificam as propriedades e comportamento do RPA em relação ao dano por fadiga (aumentou a vida de fadiga) e deformação permanente. Além disso, os resultados indicaram que foi possível fazer uma boa correlação dos resultados encontrados na fase da MAF com aqueles encontrados no concreto asfáltico, podendo assim a MAF ser utilizada para previsão do comportamento de concretos asfálticos.

Figura 6 - Molde para fabricação e compactação de MAF's



Fonte: Nabizadeh (2015).

2.5 ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA INVESTIGAÇÃO DA RIGIDEZ VISCOELÁSTICA E TRINCAS NA MAF

2.5.1 Ensaio de Varredura de Deformação

O ensaio de varredura de deformação é um tipo de teste oscilatório, onde o material é submetido a uma deformação senoidal, conforme demonstrado na Equação (1), obtendo como resposta a tensão (τ), obtida pela Equação (2).

$$\gamma = \gamma_o \times \text{sen } \omega t \quad (1)$$

$$\tau = \tau_o \times \text{sen } (\omega t + \delta) \quad (2)$$

Sendo τ_o a amplitude máxima de tensão, γ_o a amplitude máxima de deformação, ω a velocidade angular, t o tempo e δ o ângulo de fase.

O comportamento limite para os materiais são: os sólidos elásticos que seguem a Lei de Hooke, em que a tensão resultante é proporcional a amplitude de deformação, e assim a tensão e a deformação estão em fase ($\delta = 0$); fluídos viscosos que seguem a Lei de Newton, em que a tensão e deformação estão fora de fase ($\delta = 90^\circ$). Os materiais viscoelásticos, que é o caso das misturas asfálticas, apresentam propriedades intermediárias entre as dos sólidos de Hooke e os fluídos de Newton. As suas tensões resultantes oscilam com a mesma frequência angular (ω), mas defasadas em relação à deformação, pois possuem contribuição tanto da parte viscosa como da parte elástica.

A partir das Equações 1 e 2 é determinado o valor absoluto do módulo complexo, conhecido como módulo dinâmico ($|G^*|$) através da relação da amplitude da tensão de carregamento pela amplitude de deformação, segundo a Equação (3) (BERNUCCI et al., 2008):

$$|G^*| = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \quad (3)$$

O módulo dinâmico ($|G^*|$) tem sido a base para o desenvolvimento de modelos de previsão para caracterizar a resposta tensão deformação de misturas asfálticas (MARQUES, 2004). Este pode ser dividido em duas componentes: módulo de armazenamento (*storage modulus* - G') e módulo de perda (*loss modulus* - G''). O módulo de armazenamento (G') representa o componente em fase do módulo complexo (G^*), ou seja, a componente elástica de G^* , já o módulo de perda (G'') representa o componente defasado do módulo complexo, ou seja, a componente viscosa de G^* . Para um sólido ideal, G'' é igual a zero, ou seja, não há nenhuma perda pois o material é perfeitamente elástico e G^* é igual a G' . Para um líquido ideal, G' é igual a zero, onde não há nenhuma rigidez em um líquido, e G^* é igual a G'' (SCHULTZ e STRUBLE, 1993).

$$G^* = G' + iG'' \quad (4)$$

$$G' = G^* \cos(\delta) \quad (5)$$

$$G'' = G^* \sin(\delta) \quad (6)$$

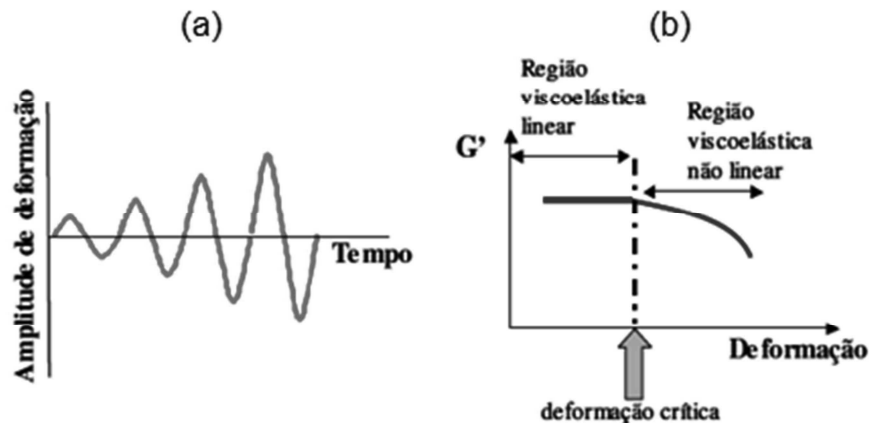
$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (7)$$

Quando se deseja analisar a viscoelasticidade dos materiais é necessário que a caracterização reológica ocorra na região viscoelástica linear, no qual o módulo elástico independe da deformação aplicada. Essa região é delimitada pela deformação crítica, que é a máxima deformação que pode ser aplicada sem que a estrutura do material seja alterada.

No ensaio de varredura de deformação aumenta-se a amplitude de deformação mantendo-se a frequência constante, como pode ser observado na Figura 7(a). Com os resultados obtidos do ensaio monta-se um gráfico deformação versus

componente elástica (G'), com escala logarítmica nos dois eixos. A partir do gráfico é possível encontrar a deformação crítica, que se localiza no ponto onde a curva da componente elástica (G') começa a decrescer, ou seja, onde a estrutura se rompe, ilustrado na Figura 7 (b).

Figura 7 - Representação do ensaio de varredura de deformação (a), e representação da determinação da deformação crítica (b).



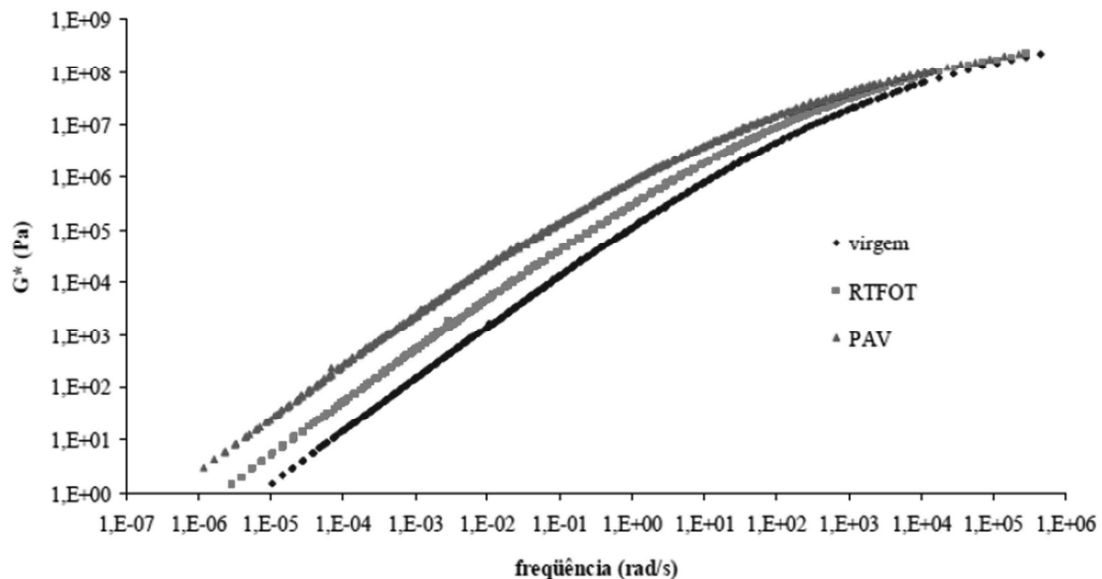
Fonte: Betioli (2007).

Com a determinação da deformação crítica é possível identificar a região viscoelástica linear e a não linear e assim ser utilizada para a realização do ensaio de varredura de frequência.

2.5.2 Ensaio de Varredura de Frequência

É através do ensaio de varredura de frequência que é possível fazer a caracterização do comportamento viscoelástico linear das MAF's, a partir da construção de curvas mestre. Estas consistem basicamente de um gráfico de dispersão, onde o eixo das ordenadas consiste de uma propriedade viscoelástica (como, por exemplo, o módulo complexo) e o eixo das abscissas é dado pela frequência de aplicação do carregamento, como ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação de curva mestre, na temperatura de 25° C, para o CAP 50/70, nas condições virgem, RTFOT e PAV.



Fonte: Bechara et al. (2008) apud Alencar (2009).

O teste consiste na aplicação da tensão de cisalhamento ou da deformação, na forma de uma função senoidal com frequência variável à amplitude e temperatura constantes. A varredura de frequência é um dos tipos de testes oscilatórios e mostra como o comportamento elástico e viscoso de um material varia com as taxas de aplicação de deformação e tensões.

Para a realização do ensaio é necessário serem definidos os limites superiores e inferiores da frequência, o número de intervalos entre esses limites e a amplitude da tensão (ou deformação), de forma que esta amplitude permita que o material a ser ensaiado permaneça dentro da faixa de viscoelasticidade linear durante todo o intervalo de frequência aplicada (NASCIMENTO, 2007).

- Obtenção de Curva Mestre

As curvas mestras são utilizadas na análise do desenvolvimento de uma propriedade reológica, como ângulo de fase (δ) ou módulo complexo (G^*), em função da frequência ou tempo de aplicação do carregamento, descrevendo o comportamento reológico do material para uma única temperatura, denominada temperatura de referência, em um espectro de frequências ou tempos de carregamento. Dessa forma, com a curva mestra faz-se a caracterização do material

ao longo de toda a faixa de temperaturas, ou tempo de carregamento, que este pode estar suscetível ao longo da sua vida útil (BARDINI, 2013).

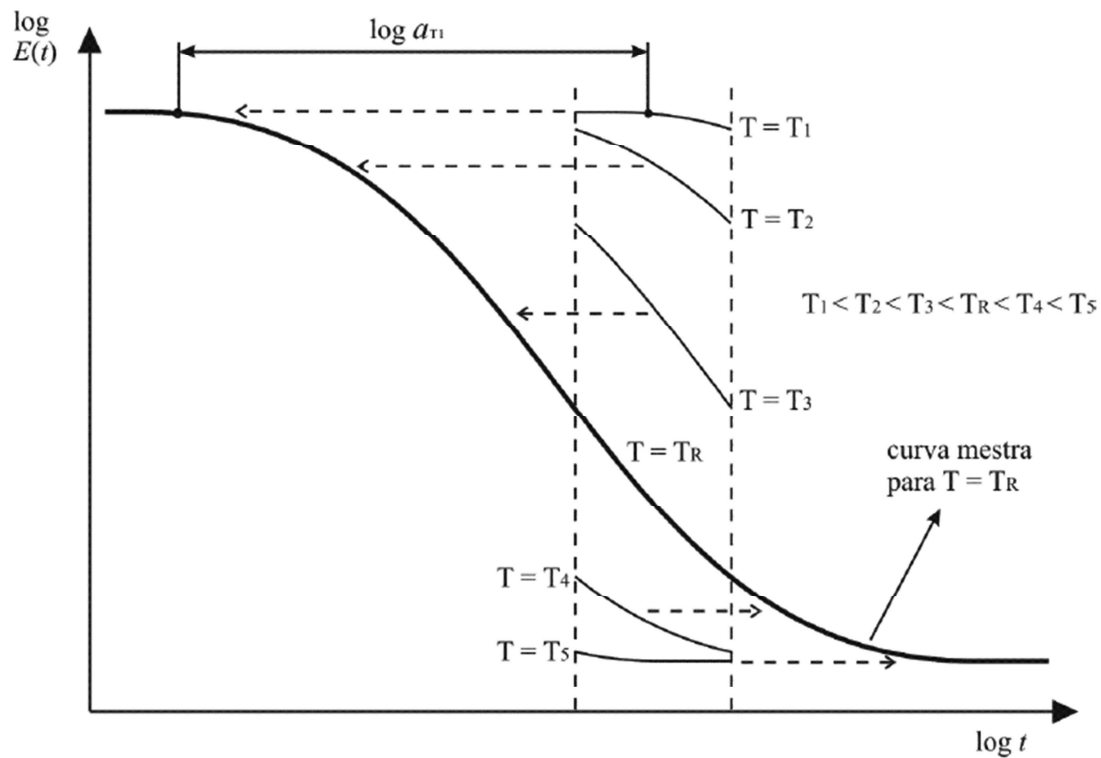
Com o desenvolvimento de um método analítico conhecido como Princípio da Superposição Tempo-Temperatura (PSTT) tornou-se possível a construção de curvas mestras para misturas asfálticas.

Para uma descrição completa do comportamento dos materiais viscoelásticos é necessário que as propriedades viscoelásticas sejam observadas em uma faixa de tempo muito extensa, tornando impraticável a realização do ponto de vista experimental. Devido a isto é utilizado o PSTT, que estabelece uma equivalência de comportamentos entre as variáveis tempo (ou frequência) e temperatura, ou seja, para as propriedades mecânicas do material, a redução da frequência (ou aumento do tempo de carga) equivale ao aumento da temperatura. O PSTT permite o deslocamento das curvas experimentais, que são obtidas em um reduzido tempo de observação, no eixo do tempo (eixo horizontal), através de um fator de deslocamento horizontal (α_T), resultando na curva mestra.

O PSTT para a construção de uma curva-mestra é muito útil para projetos que considerem o desempenho do material ao longo do tempo, em determinadas temperaturas, sob diversos estágios de carregamento.

Para a construção da curva mestra empregando-se o PSTT é necessário a realização de ensaios dinâmicos, como os descritos anteriormente, obtendo propriedades reológicas dispostas em um gráfico (com escala log-log) em função de faixas curtas de frequência, sob diferentes temperaturas (Figura 9). Uma temperatura de referência deve ser escolhida e então os dados coletados à diferentes temperaturas são deslocados horizontalmente em relação ao tempo até que as curvas se ajustem em uma única função representando a curva de referência (BRINGEL et al., 2009).

Figura 9 – Representação da construção da curva mestra para o módulo de relaxação de um material



Fonte:

Souza (2005).

A dependência do fator de deslocamento (α_T) com a temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius (Equação (8)) ou de Williams-Landel-Ferry (Equação (9)) - conhecida por equação de WLF - (Williams et al., 1955; Dongréet al., 1996), apresentadas abaixo.

$$\log \alpha_T = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (8)$$

Onde,

T_R : temperatura de referência;

α_T : fator de deslocamento horizontal para temperatura de ensaio T em relação à temperatura de referência T_R ;

C : constante da equação de Arrhenius, característica de cada material viscoelástico.

$$\log(\alpha_T) = \frac{C_1 \cdot (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad (9)$$

Onde,

C_1 e C_2 : constantes empíricas da equação de WLT, características de cada material viscoelástico.

De acordo com Cheung (1995), caso a diferença entre a temperatura a ser deslocada e a temperatura de referencia ($T - T_R$) seja menor ou igual a 20°C a equação de Arrhenius fornece um melhor ajuste dos resultados. Por outro lado, quando essa diferença ($T - T_R$) é maior do que 20°C a equação de WLF é a mais indicada.

É importante destacar que a utilização das equações tanto de Arrhenius como de WLF devem ser acompanhadas de observação visual da curva mestra resultante, pois o PSTT não estabelece uma relação exata, e sim aproximada entre o tempo de observação e a temperatura de execução do teste.

Isto ocorre devido a heterogeneidade das misturas asfálticas, em que dificilmente existirá uma equação analítica única capaz de descrever um fator de deslocamento horizontal apropriado para todas as temperaturas de ensaio, e assim métodos numéricos ou adaptações das equações analíticas devem ser utilizados (BUTTLAR et al., 1998 apud SILVA, 2009).

2.5.3 Ensaios de fratura

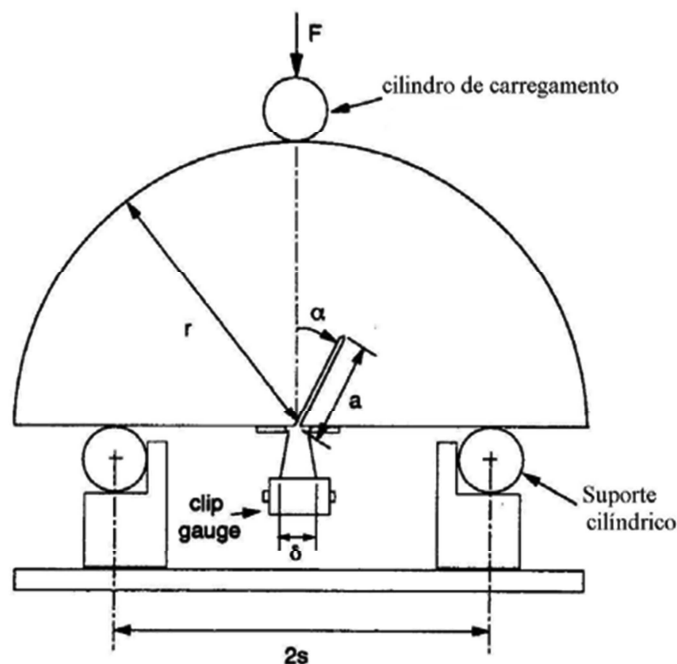
A mecânica da fratura é uma ferramenta utilizada para caracterização do início e propagação de trincas para todos os tipos de materiais. Essa abordagem tem sido empregada para o entendimento do mecanismo da fratura em materiais asfálticos antes mesmo da década de 1960 (MOAVENZADEH, 1967 apud LI e MARASTEANU, 2010) e tem se tornado popular desde a década de 1990.

2.5.3.1 Ensaio de fratura em corpo-de-prova com geometria semi-circular (Semi-Circular Bending Test – SCB)

Para a análise dos mecanismos relacionados à fratura, vários métodos e geometrias de amostras já foram propostos. Atualmente, as características de fratura de misturas asfálticas têm sido avaliadas no laboratório através dos ensaios: Ensaio de flexão em três pontos adotando a geometria de viga com um entalhe (*Single edge notched beam* (SENB)), Ensaio de tração em Disco Circular com Fenda (*Disc-shaped Compact Tension* (DCT)) e o ensaio de fratura em corpo de prova com geometria semi-circular (*Semi-Circular Bending Test* (SCB)).

A realização do ensaio de fratura com geometria de corpo-de-prova semi-circular foi originalmente proposta por Chong e Kurrupu (1984), para materiais como rochas e concreto. O corpo-de-prova SCB é a metade de um disco com um entalhe de a -mm de comprimento e que forma um ângulo α com o centro vertical do disco. Este entalhe funciona como uma pré-trinca com o ponto de maior concentração de tensão conhecido e assim é possível observar o caminho de propagação do trincamento. O procedimento de realização do teste esta esquematizado na Figura 10.

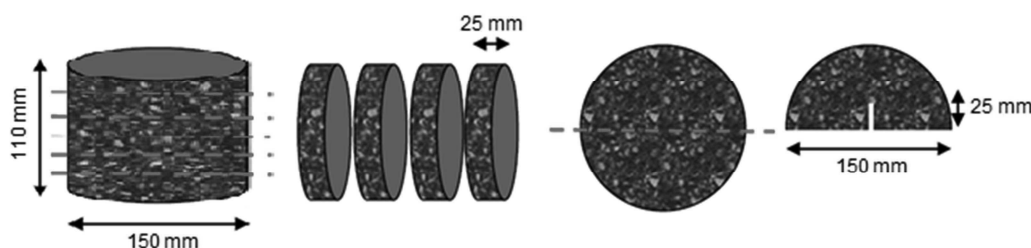
Figura 10 - Semi-Circular Bend Test (SCB)



Fonte: Lim et al. (1993) apud Alvarez (2004).

Esse ensaio apresenta algumas vantagens como economia e facilidade na realização e na preparação dos corpos-de-prova (Figura 11), pois muitos corpos-de-prova SCB podem ser obtidos partir de um único corpo-de-prova cilíndrico produzido em laboratório, através do corte deste, resultando em uma economia de tempo para a fabricação das amostras (LUTIF, 2011), apresenta ainda a possibilidade de extração das amostras em campo (ao contrário do ensaio SENB), rapidez na execução do ensaio, além de repetibilidade, consistência e geração dos parâmetros de fratura necessários para análises (BILIGIRI e SAHA, 2016). Hirsch (2009) citou como desvantagem do ensaio SCB possíveis restrições no início da trinca devido a pequena área disponível do corpo de prova por onde a trinca deve propagar, resultando em complicações no estado de tensões gerado.

Figura 11 - Esquema da produção dos corpos-de-prova SCB



Fonte: Lutif (2011).

O ensaio SCB vem sendo reconhecido como ensaio apropriado para realizar testes de fratura e pode ser usado para determinar o fator de intensidade de tensão do modo I, e também o fator de intensidade de tensão dos modos II e III, dependendo do ângulo do entalhe (α), mas se o ângulo for igual a zero, a fratura sempre ocorrerá no modo I (LIM et al., 1993).

No trabalho desenvolvido por Chong e Kurrupu (1988) os valores de tenacidade à fratura obtidos no material estudado, xistos betuminosos, estavam de acordo com os encontrados por outros autores, para o mesmo material. Nesta pesquisa, eles notaram que a tenacidade a fratura medida no ensaio SCB não depende do comprimento da trinca nem da espessura do corpo-de-prova. Essa observação pôde ser confirmada depois por outros pesquisadores.

No ensaio SCB o corpo-de-prova fica apoiado em dois roletes equidistantes de 120 mm (para corpos de prova moldados no compactador giratório SUPERPAVE), onde fitas de Teflon podem ser utilizadas para reduzir o atrito entre os dois cilindros e o corpo-de-prova. O mesmo tipo de carregamento utilizado no ensaio de tração indireta também pode ser utilizado no ensaio SCB. O deslocamento de carga pode ser medido através de um extensômetro colocado verticalmente no comprimento da haste enquanto que o deslocamento de abertura da trinca pode ser registrado por um *clip-on gage* colocado na parte inferior do corpo-de-prova. Uma carga de contato de no máximo 0,3 kN deve ser aplicada antes do carregamento real para assegurar a uniformidade de contato entre o corpo-de-prova e o ponto de carga. Uma taxa constante de abertura de trinca é aplicada, gerando um gráfico de carga *versus* deslocamento de abertura da trinca. O ensaio encerra ao atingir um valor de carga de 0,5 kN, na região pós-pico (MARASTEANU et al., 2007).

Wu et al. (2005) avaliaram a resistência a fratura de concretos asfálticos variando o tipo de ligante asfáltico, tamanho máximo nominal dos agregados e nível de compactação através do ensaio SCB. Nas amostras foram feitos entalhes com 3 mm de espessura e três comprimentos diferentes (25,4 mm; 31,8 mm e 38 mm), sendo preparadas três amostras para cada caso. A velocidade de carregamento utilizada foi de 0,5 mm/min à temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Análises estatísticas dos resultados mostraram que o carregamento máximo suportado pode ser influenciado pelo tipo de ligante, nível de compactação ou pelo TMN dos agregados para as amostras com entalhe de 25,4 mm. Já para amostras com entalhe de 31,8 mm observou-se que as mesmas eram sensíveis apenas ao TMN dos agregados, enquanto que para amostras com entalhe de 38 mm o carregamento máximo não era sensível à nenhuma das variáveis. Foi encontrado que o teste SCB foi relativamente sensível à todas as variáveis estudadas e que as misturas com maior TMN apresentaram melhor resistência à fratura. O estudo concluiu que o teste SCB pode ser uma boa ferramenta para avaliação da resistência a fratura de misturas asfálticas.

Utilizando o teste SCB, Li e Marasteanu (2010) avaliaram a resistência a fratura a baixas temperaturas de concretos asfálticos com diferentes agregados e tipos de ligantes, com volume de vazios de 4% e 7%. As amostras semi-circulares deste estudo tinham 25 mm de espessura e entalhe de 5 a 30 mm em comprimento e

espessura de 2 mm. O teste foi conduzido nas temperaturas de -6°C , -18°C e -30°C , a uma taxa de abertura da trinca de 0,0005 mm/s. Foi encontrado que a resistência a fratura é significativamente afetada pelo tipo de agregado e pelo teor do volume de vazios. Maiores teores volumes de vazios resultaram em baixa resistência a fratura. Os resultados também demonstraram que o tipo de ligante influenciou na energia de fratura, assim como a taxa de carregamento e tamanho inicial do entalhe para a maior temperatura analisada enquanto que o mesmo não foi observado para as duas menores temperaturas.

Aragão et al. (2014) conduziram um trabalho onde uma metodologia combinando testes experimentais e modelagem computacional foi utilizada para a caracterização de propriedades de fratura de MAF's, submetidas a diferentes taxas de carregamento à condição de temperatura intermediária. Para isto, os ensaios de fratura como SCB, SENB e DCT foram realizados. Os autores observaram que considerar a área sob a curva força-deslocamento equivalente a energia de fratura não seria o mais adequado pois outras fontes de dissipação de energia estariam sendo incluídas no cálculo da energia de fratura. Ainda concluíram que diferentes propriedades de fratura à baixas temperaturas podem ser determinadas a partir de um único tipo de ensaio, independente da forma da geometria ou da configuração do carregamento, o que implica em consideráveis ganhos em tempo e esforços experimentais.

Mais recentemente, Biligiri e Saha (2016) apresentaram o estado da arte sobre a utilização do ensaio SCB para avaliação de propriedades de fratura de misturas asfálticas, mostrando como eram feitas as avaliações básicas, como são feitas as avaliações avançadas, o estudo da propagação das trincas e futuras análises que poderão ser feitas. Nesse estudo ainda foi apresentado uma compilação de trabalhos que utilizaram o ensaio SCB em materiais asfálticos, com mais de trinta estudos desde o ano de 1984 até 2015. Os autores encontraram que, no geral, o procedimento do teste SCB é um promissor modo de avaliação da propagação de trincas em misturas asfálticas, recomendando-se que em futuros estudos concentrem-se no desenvolvimento de testes SCB cíclicos para investigar o comportamento dinâmico da fadiga juntamente com as propriedades viscoelásticas.

2.5.3.2 Ensaio de varredura de tempo

Como sabido, o trincamento por fadiga é um problema decorrente de ações de carregamentos repetidos ou cíclicos atuante no revestimento asfáltico, em que as primeiras manifestações são microfissuras e com o decorrer do tempo estas se unem e formam as macrotrincas, podendo inclusive, resultar na completa ruptura do pavimento. Por ser um dos principais problemas nas camadas asfálticas de revestimento em pavimentos flexíveis, faz-se necessário a análise e desenvolvimento de modelos para previsão do comportamento das misturas asfálticas com relação ao trincamento por fadiga.

São muitos os modos de se realizar em laboratório a avaliação de vida de fadiga de misturas asfálticas, sendo uma delas o ensaio de varredura de tempo, também conhecida como *Time Sweep Test (TS)*. O ensaio de varredura de tempo é um tipo de ensaio de fadiga que consiste na aplicação de uma deformação cíclica senoidal sobre o corpo-de-prova, de amplitude constante, até que a amostra atinja a ruptura. Durante o ensaio a resposta do corpo-de-prova à esse esforço é monitorada, coletando informações como sua deformação, carga, ângulo de fase e módulo complexo de perda e de armazenamento. Como o ensaio é realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico, as amostras produzidas possuem as dimensões já comentadas de diâmetro de 12mm e altura de 50mm.

Este ensaio pode ser realizado tanto à tensão controlada quanto à deformação controlada (CASTELO BRANCO, 2008). Entretanto, a metodologia de análise dos resultados adotada nesta pesquisa (explicada a seguir) independe do modo de carregamento aplicado. Para a presente pesquisa optou-se pela realização do ensaio a tensão controlada. Ainda segundo Castelo Branco (2008), os valores de amplitude de deformação ou tensão aplicados devem ser escolhidos com base na rigidez das amostras e no máximo torque que o reômetro é capaz de aplicar, permitindo que a vida de fadiga seja maior que 30 minutos e menor que 5 horas.

Com os dados obtidos no ensaio de varredura de tempo é possível ser feita uma interpretação das características do material com relação ao dano por fadiga, através do uso do Excel para cálculo dos parâmetros presentes na teoria aplicada no Modelo simplificado do dano contínuo viscoelástico.

- Modelo simplificado do dano contínuo viscoelástico (Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD) Model)

O modelo S-VECD têm sido utilizado para previsão de dano relacionado à fadiga em misturas asfálticas, ligantes asfálticos e mais recentemente em MAF's (UNDERWOOD et al., 2010; KARKI, 2014; BABADOPULOS, 2014; MARTINS, 2014; FREIRE, 2015). Daniel e Kim (2002) implementaram o modelo VECD para previsão do desempenho de pavimentos asfálticos e mais recentemente Underwood et al. (2012) propuseram uma simplificação do modelo.

A teoria do modelo S-VECD esta baseada no conceito da Teoria do trabalho potencial de Schapery e no Princípio da correspondência elástica-viscoelástica proposta por Schapery, substituindo a deformação pela pseudo-deformação (que representa a relação da tensão viscoelástica linear por um módulo de referência) com objetivo de transformar o comportamento viscoelástico em um comportamento linear do material.

Este modelo leva em consideração características fundamentais dos materiais para se analisar a evolução do dano gerado durante o ensaio de fadiga, denominado de S. Dois parâmetros são quantificados no modelo S-VECD que são: a pseudo-rigidez (C), que está relacionada com a integridade do material, e o dano (S), que é encontrado a partir de mudanças na microestrutura causadas pela perda da integridade do material. A curva característica do dano representa a relação entre esses dois parâmetros, e esta é única para cada tipo de material, isto é, a curva (C x S) representa uma propriedade fundamental do material. Portando a curva característica do dano para um dado material será sempre a mesma, independente do ensaio ser à tensão ou deformação controlada, do modo de carregamento (monotônico ou cíclico) ou da variação de frequência e temperatura utilizada (DANIEL e KIM, 2002 apud FREIRE, 2015).

A pseudo-deformação (γ^R) representa a relação entre a tensão viscoelástica linear obtida de um carregamento arbitrário pelo seu correspondente módulo de referência (G_R), que geralmente é definido como unitário.

$$\gamma^R = \frac{\tau_{LVE}}{G_R} \quad (10)$$

Da relação entre a deformação e pseudo-deformação, outro parâmetro pode ser obtido, chamado de pseudo-rigidez, denotado como $C(S)$. A pseudo-rigidez está relacionada com a integridade (C) do material, podendo variar de 1 a 0. Quando $C(S)$ é igual a um, significa que o material não possui nenhum tipo de dano, já quando o material apresenta $C(S)$ igual à zero, significa que o mesmo não é capaz de suportar mais nenhum tipo de dano.

O cálculo da pseudo-rigidez pode ser observado na Equação (11). Para seu cálculo é levado em consideração um fator de correção denominado de Dynamic Modulus Ratio (DMR), utilizado para corrigir a dispersão obtida de amostra para amostra. O parâmetro DMR pode ser determinado através da relação do módulo dinâmico obtido no ensaio de fadiga ($|G^*|_{\text{fingerprint}}$) pelo módulo dinâmico ($|G^*|_{LVE}$) obtido na região viscoelástica linear do material e mesma frequência e temperatura em que o ensaio de fadiga é realizado. A obtenção de ($|G^*|_{LVE}$) pode ser por meio do cálculo apresentado na Equação (13), utilizando coeficientes da série de Prony fitados dos dados do ensaio experimental.

$$C(S) = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}^R \cdot DMR} \quad (11)$$

$$DMR = \frac{|G^*|_{\text{fingerprint}}}{|G^*|_{LVE}} \quad (12)$$

$$|G^*|_{LVE} = \sqrt{\left[G_{\infty} + \sum_{m=1}^N \frac{G_m \omega_R^2 \rho_m^2}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2 + \left[\sum_{m=1}^N \frac{G_m \omega_R \rho_m}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \right]^2} \quad (13)$$

$$\omega_R = \omega \cdot a_T \quad (14)$$

Onde ω_R é a frequência angular reduzida, ω é a frequência angular utilizada no ensaio de fadiga e a_T é o fator de deslocamento tempo-temperatura para a temperatura do ensaio de fadiga.

Outra forma de obtenção do ($|G^*|_{LVE}$), como a utilizada por Karki (2014), seria através da aplicação de pequena deformação de cisalhamento senoidal na amostra,

por determinado período de tempo, na frequência e temperatura em que seria realizado o teste de fadiga, utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico. As tensões e amplitudes de deformações computadas ao longo do ensaio seriam então utilizadas para cálculo do $(|G^*|_{LVE})$, através da Equação (15).

$$|G^*| = \frac{\tau_o}{\gamma_o} \quad (15)$$

Para o cálculo do acúmulo de dano, primeiramente é necessário o cálculo da pseudo-deformação entre picos (γ_{pp}^R) para cada ciclo de carregamento do ensaio (Equação (16)). Assim é possível obter a variável de acúmulo de dano (S) que está em função da variação da integridade do material ao longo do ensaio (Equação (17)).

$$\gamma_{pp}^R = \frac{1}{G_R} (\gamma_{pp} \cdot |G^*|_{LVE}) \quad (16)$$

$$S = \sum_{i=1}^N \left[\frac{DMR}{2} (\gamma_{pp}^R)^2 (C_{1-i}^* - C_i^*) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot [t_i - t_{i-1}]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (17)$$

As curvas características do dano podem ser representadas através de função exponencial, ou através de uma função denominada de “Power Law”, apresentadas nas Equações (18 e (19, respectivamente. Na Equação (18, a e b são os coeficientes exponenciais e na Equação (19, C_{11} e C_{12} são os coeficientes da Power Law.

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (18)$$

$$C(S) = 1 - C_{11} S^{C_{12}} \quad (19)$$

Karki (2014) foi o primeiro a utilizar o modelo S-VECD para analisar MAF's. O autor analisou a fadiga e potencial de recuperação das misturas, utilizando o ensaio de varredura de tempo no reômetro de cisalhamento dinâmico à tensão controlada com amplitudes de 250, 275, 350 e 400 KPa para frequência de 10 Hz e 225 e 275 KPa para frequência de 5 Hz, na temperatura de 25°C. O critério de ruptura foi estabelecido como sendo a redução de 60% da rigidez inicial. Assim como o apresentado na teoria, as curvas C x S obtidas apresentaram o mesmo formato,

reforçando que esta é uma propriedade do material, independente do modo de carregamento.

Freire (2015) utilizou o modelo S-VECD para avaliar a influência de diferentes TMN de agregados na vida de fadiga de MAF's. O autor realizou ensaio de varredura de tempo tanto à tensão controlada quando a deformação controlada. Com os resultados, além da obtenção das curvas de integridade (C) pelo acúmulo de dano (S), também foram simulados testes cíclicos em diferentes condições de carregamento, através da construção de envoltórias de fadiga (curvas de Wöhler). Dos resultados foi concluído que as curvas C x S não são dependentes do modo de carregamento, corroborando com o encontrado na literatura, portanto essa metodologia para caracterização do dano pode ser utilizada.

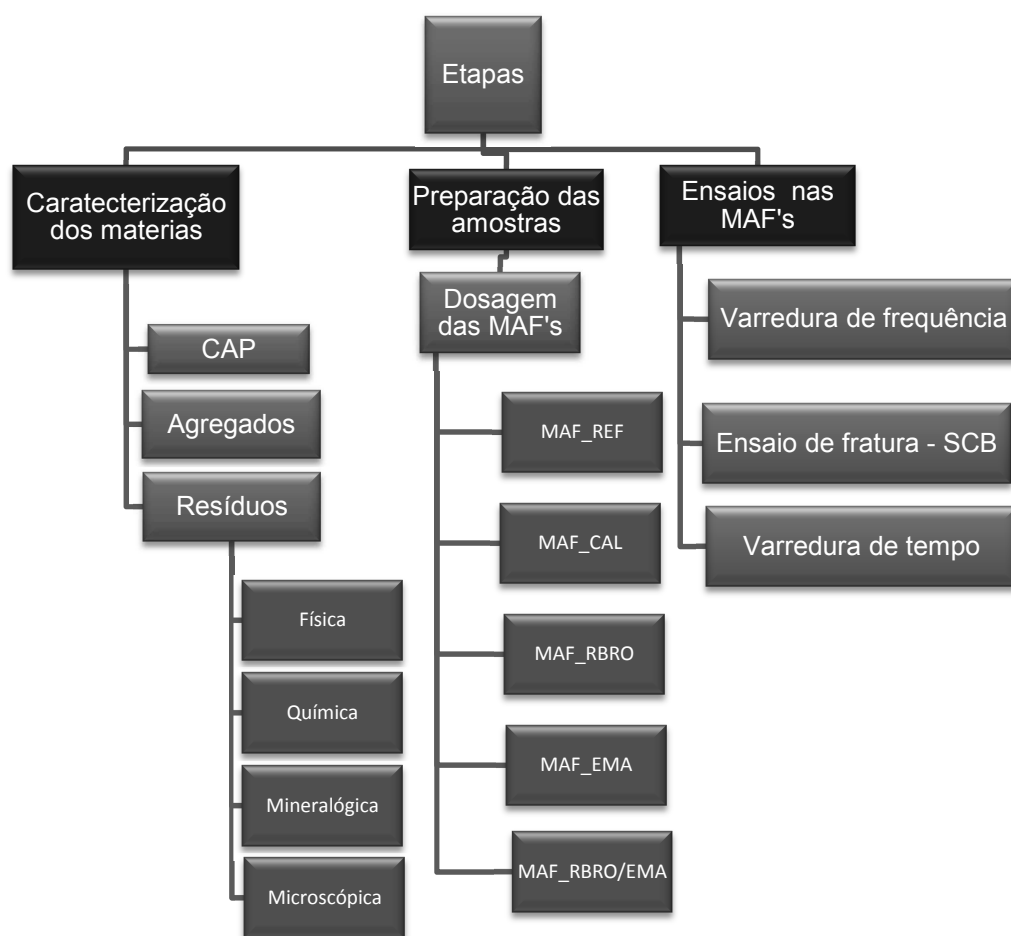
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia científica utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, visando analisar os efeitos na rigidez viscoelástica lielar e trincamento de diferentes matrizes de agregados finos (MAF) variando o tipo de filer entre elas. Ensaio de caracterização dos constituintes individuais bem como das MAF's são apresentados.

3.1 MATERIAIS E MATRIZ EXPERIMENTAL

Os agregados utilizados para a composição da MAF foram brita 1, brita 0, granilha, pó-de-pedra e o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70. Um total de cinco MAF's foram avaliados, sendo elas (1) MAF de referência, (2) MAF_CAL, com substituição de 2% de cal hidratada, (3) MAF_RBRO, com substituição de 2% de resíduo do beneficiamento de rocha ornamental, (4) MAF_EMA, com substituição de 2% de escória moída de aciaria tipo LD e (5) MAF_RBRO/EMA, com substituição de 2%, ou seja, 1% de RBRO e 1% de EMA. A Figura 12 apresenta o programa experimental adotado.

Figura 12 – Matriz experimental



Fonte: Produção da Autora.

Como mencionado, a Cal e os resíduos RBRO e EMA foram submetidos a ensaios de caracterização (resumidos no Quadro 1 antes da sua utilização nas misturas asfálticas, para conhecimento de suas características). Estes fileres foram os mesmos utilizados por Gottardi (2015) e Cosme (2015) e, portanto a sua caracterização foi feita pelos citados autores sendo os resultados apresentados mais adiante. Mais informações sobre os ensaios de caracterização podem ser consultados nos trabalhos dos referidos autores.

Quadro 1 – Ensaios realizados para caracterização dos fileres

	Característica analisada/Ensaio realizado	RBRO	EMA	CAL
Caracterização física	Granulometria (Difratometria a laser)	x	x	x
	Massa específica real (DNER 085/94)	x	x	x
Caracterização mineralógica	Difração de raios X	x	x	x
Caracterização química	Espectrometria por fluorescência de raios X	x	x	
Caracterização microscópica	Microscópio eletrônico de varredura	x	x	
	Espectrometria por Energia Dispersiva	x	x	

Fonte: Produção da Autora.

3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O tipo de cimento asfáltico de petróleo escolhido foi o CAP 50/70, cedido pela Usina Terra Brasil. As especificações deste CAP foram cedidas pela empresa e estão de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005), onde podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização do CAP 50/70

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	ASTM D5	50 a 70	53	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	ASTM D 36	46 min	49,4	Grau °C
Viscosidade Brookfield 135GC SP21 20RPM	ASTM D 4402	274 min	300	cp
Viscosidade Brookfield 150GC SP21	ASTM D 4402	112 min	153	cp
Viscosidade Brookfield 177GC SP21	ASTM D 4402	57 a 285	58	cp
RTFOT – Penetração Retida	ASTM D 5	55 min	62	%
RTFOT – Aumento do Ponto de Amolecimento	ASTM D 36	8max	4,2	Grau C
RTFOT – Ductilidade 25GC	ASTM D 113	20 min	>150	Cm
RTFOT – Variação em % Massa	ASTM D 2872	-0,50 a 0,50	-0,226	%
Ductilidade 25GC	ASTM D 113	60 min	>150	Cm
Solubilidade no Tricloroetileno	ASTM D 2042	99,5 min	99,9	% massa
Ponto de Fulgor	ASTM D 92	235 min	338	Grau C
Índice de suscetibilidade térmica	ASTM X 018	-1,5 a 0,7	-1,2	N/A
Densidade relativa a 20/4 GC	ASTM D70	-	1,008	N/A
Aquecimento a 177GC	ASTM X 215	Não espuma	Não espuma	N/A

Fonte: Laboratório REGAP.

3.1.2 Agregados

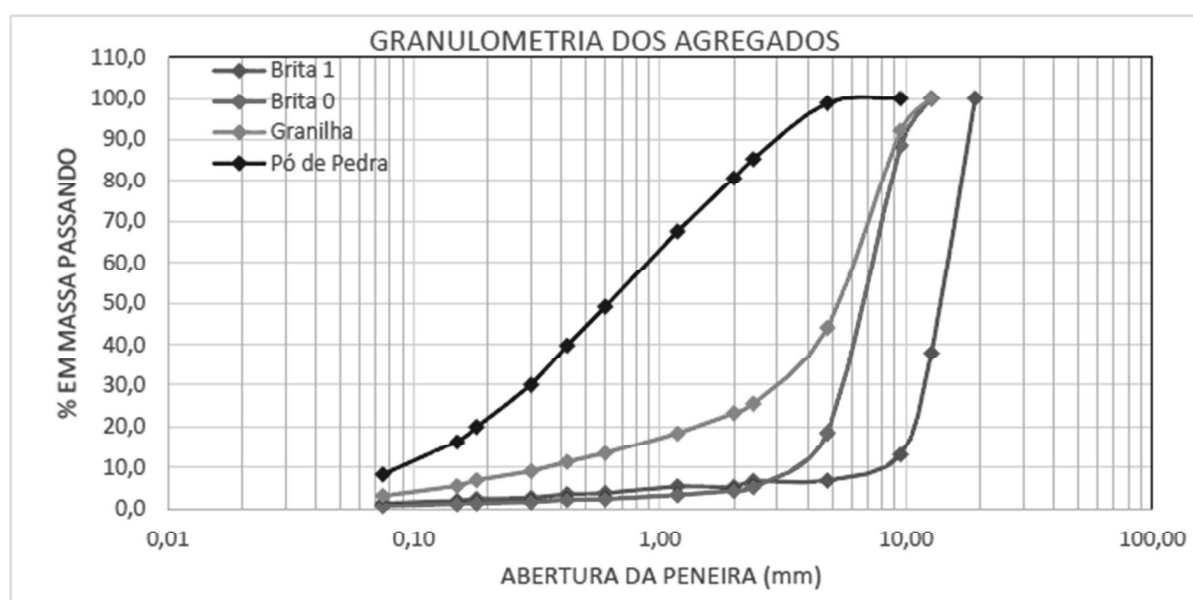
Os agregados são provenientes da Pedreira Rydien Mineração Indústria e Comércio Ltda localizada na cidade de Vila Velha (ES) e foram os mesmos utilizados por

Gottardi (2015), pois foi utilizada como base a dosagem dos concretos asfálticos encontrada pelo autor. O tipo de rocha original é o Granito sendo sua resultante o Gnaisse. Seguiu-se a norma DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997) para coleta de amostras de brita 1, brita 0, granilha e pó de pedra.

3.1.2.1 Análise granulométrica

A Figura 13 apresenta a distribuição granulométrica de cada agregado que foi utilizado na pesquisa. Na Tabela 8 são apresentados os resultados de massa específica, abrasão *Los Angeles* e equivalente de areia dos agregados utilizados.

Figura 13 - Curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos



Fonte: Gottardi (2015).

Tabela 8 – Massa específica dos agregados

Agregado	Massa Específica Real (g/cm³)	Abrasão <i>Los Angeles</i>	Equivalente de areia
Brita 1	2,793		
Brita 0	2,791	55,87%	-
Granilha	2,817		
Pó de Pedra	2,790	-	67,5%

Fonte: Adaptado de Gottardi (2015).

Apesar do resultado obtido no ensaio de Abrasão *Los Angeles* apresentado ser superior ao limite estabelecido pelo DNIT, que é de 50%, a norma (DNIT 031/2006 –

ES) admite excepcionalmente agregados com valores superiores no caso de terem apresentado comprovadamente desempenho satisfatório em utilização anterior, que aplica-se ao caso do material.

3.1.3 Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

O RBRO utilizado nesta pesquisa foi o mesmo utilizado por Gottardi (2015) e Cosme (2015) proveniente de uma empresa local de desdobramento de blocos de rocha, Granriva Granitos, localizada na cidade de Colatina (ES). A utilização deste resíduo na mistura asfáltica foi na forma de filler. Como o resíduo é fornecido na forma de lama, foi necessário um tratamento prévio do material antes do início da caracterização deste resíduo, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 14- Processos de preparação dos resíduos para sua aplicação

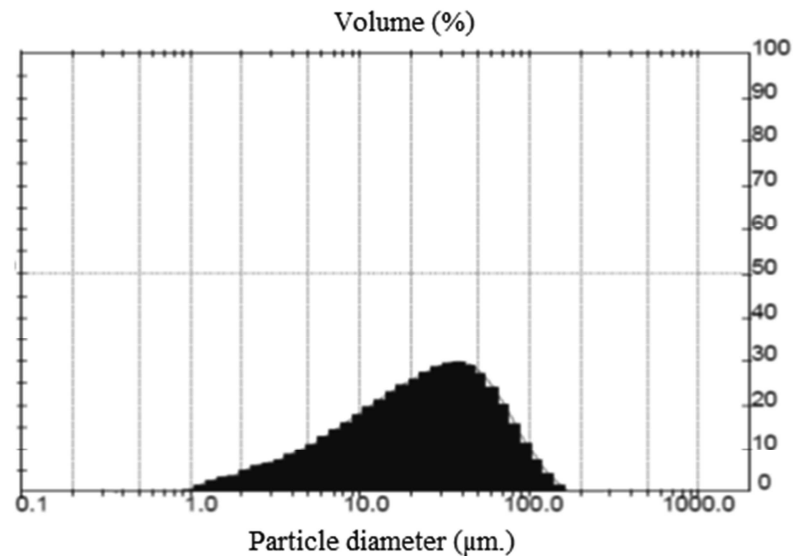


Fonte: Acervo pessoal.

O resíduo coletado foi submetido a um processo de secagem em estufa na temperatura de 105°C e em seguida foi destorroado com o auxílio do almofariz e da mão-de-grau. Posteriormente o mesmo foi moído e peneirado na peneira de nº200 (0,075 mm), homogeneizado, quarteado e colocado em sacos plásticos, para então serem realizados os ensaios de caracterização e aplicação na pesquisa.

No ensaio de massa específica real o valor encontrado foi de 2,639 g/cm³. O ensaio de diâmetro das partículas realizado através da difratometria a laser é apresentada na Figura 15, podendo-se observar que as partículas de RBRO então distribuídas entre 100 µm e 1,0 µm sendo que 30% do volume das partículas se concentram em 40 µm de diâmetro. Desta forma, o resíduo atua não só como material de enchimento, mas também como material ativo devido ao pequeno tamanho das partículas e das suas características de superfície.

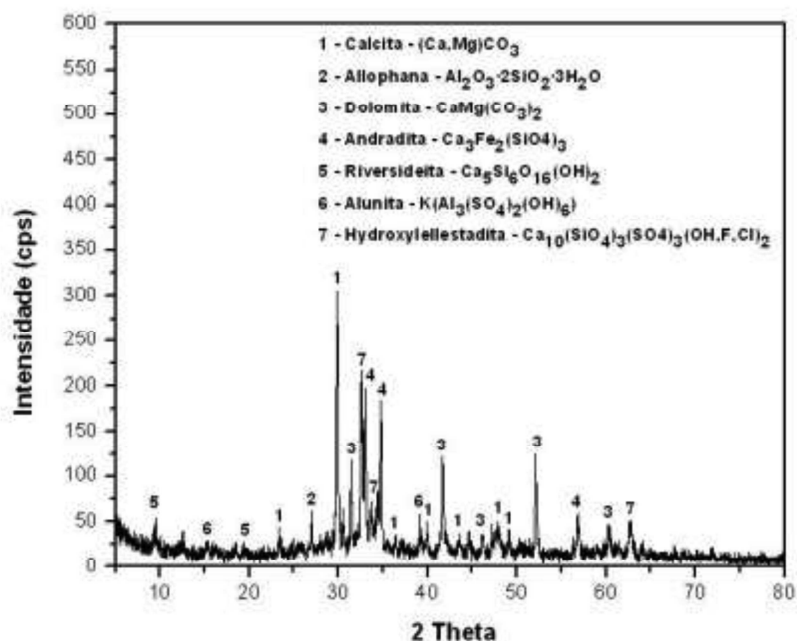
Figura 15 - Diâmetro das partículas de RBRO



Fonte: Gottardi (2015).

Na Figura 16 são apresentados os compostos químicos mais comuns encontrados no resíduo obtidos através do ensaio de Difração de Raio X e na Tabela 9 o resultado da análise semiquantitativa do resíduo. Foi observado valores significativos para o teor de sílica (SiO_2), o que pode representar um comprometimento na adesividade dos agregados com o CAP. O teor de sílica encontrado no RBRO, pode interferir na qualidade da adesividade das ligações da mistura asfáltica, pois teores mais altos de sílica podem tornar a superfície do agregado mais ácida que consequentemente prejudicará no balanceamento das cargas elétricas com os componentes do asfalto (Liberatori e Constantino, 2006). Observa-se também da composição química do resíduo, um alto teor de óxido de cálcio, que pode estar relacionado à adição de cal como lubrificante e abrasivo no processo de corte das rochas ornamentais. Este composto tem efeito positivo demonstrando a possível potencialidade da aplicação do resíduo para melhoramento da suscetibilidade a deformação permanente visto que este componente tende a aumentar a rigidez da mistura asfáltica.

Figura 16 - Características mineralógicas das partículas de RBRO



Fonte: Cosme (2015).

Tabela 9 - Análise química semiquantitativa do RBRO

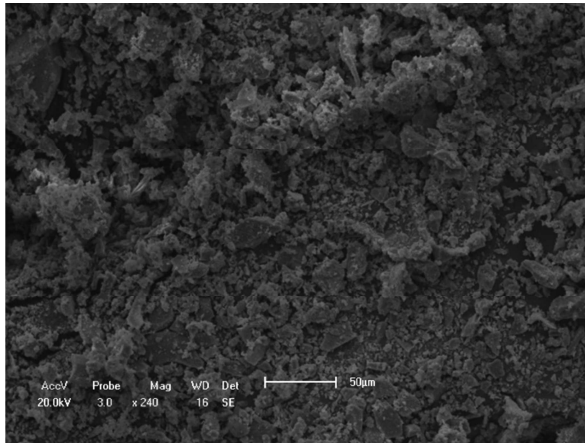
RBRO	
Óxidos	(%)
CaO	47,89
SiO ₂	23,57
Al ₂ O ₃	11,20
SO ₃	5,12
MgO	4,51
Fe ₂ O ₃	1,60
K ₂ O	0,79
TiO ₂	0,26
MnO	0,18
SrO	0,18
Cr ₂ O ₃	0,03
CuO	0,01
ZnO	0,01
P.F.	4,65

Fonte: Cosme (2015).

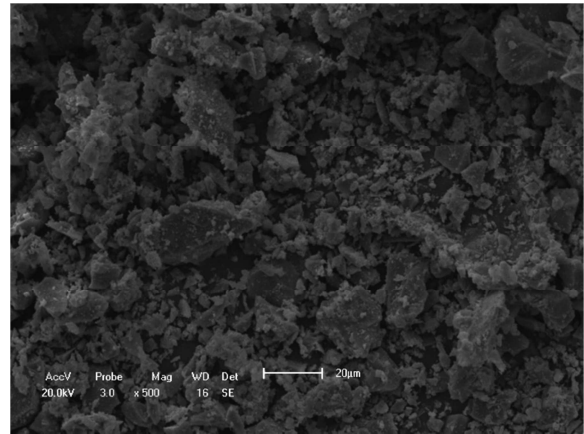
Das imagens da Figura 17 feitas pelo microscópio eletrônico de varredura, é possível notar que o resíduo apresenta grãos sem forma definida, mas em sua maioria, tende a possuir um formato lamelar devido ao processo de serragem das rochas, o que contribui para um bom intertravamento dos grãos. Também é possível

observar que os grãos possuem textura lisa, podendo prejudicar na adesividade com o ligante asfáltico.

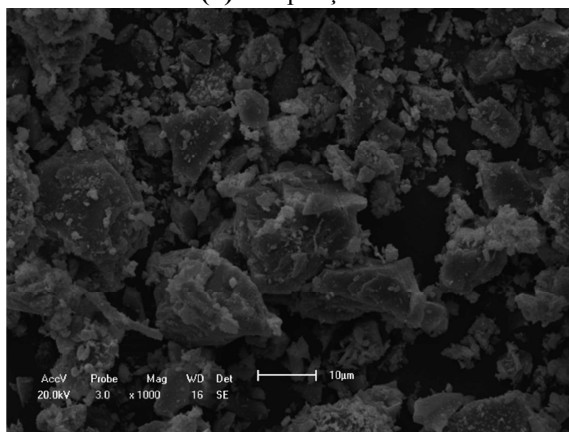
Figura 17 – Micrografia do RBRO



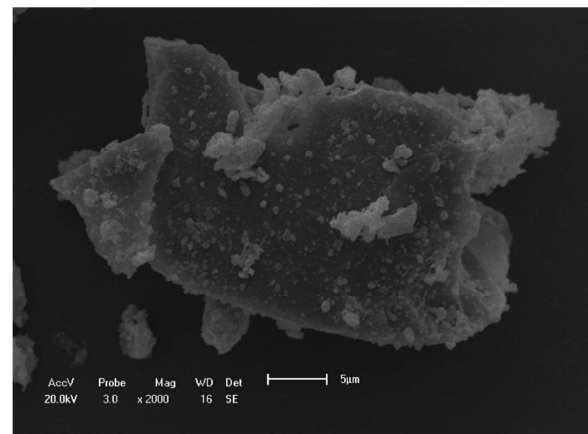
(a) Ampliação 240X



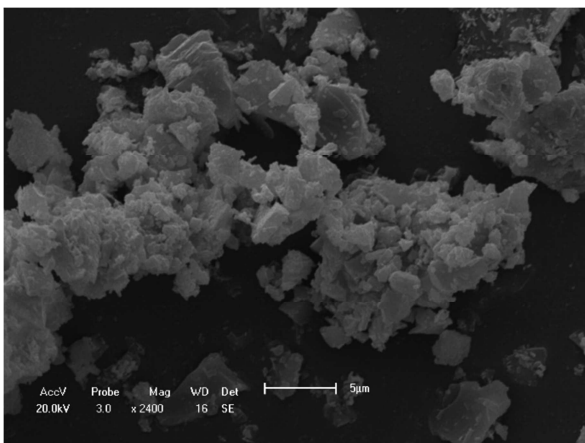
(b) Ampliação 500X



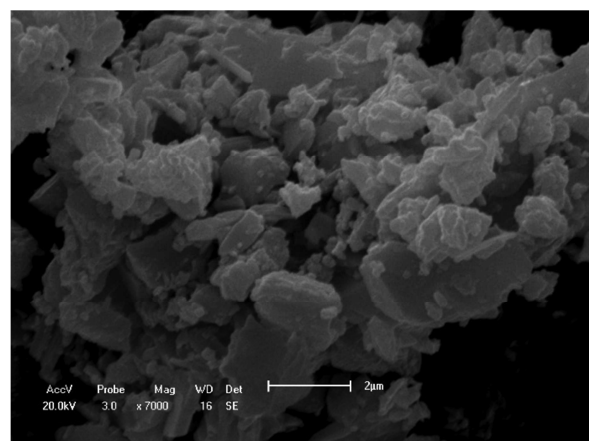
(c) Ampliação 1000X



(d) Ampliação 2000X



(e) Ampliação 2400X



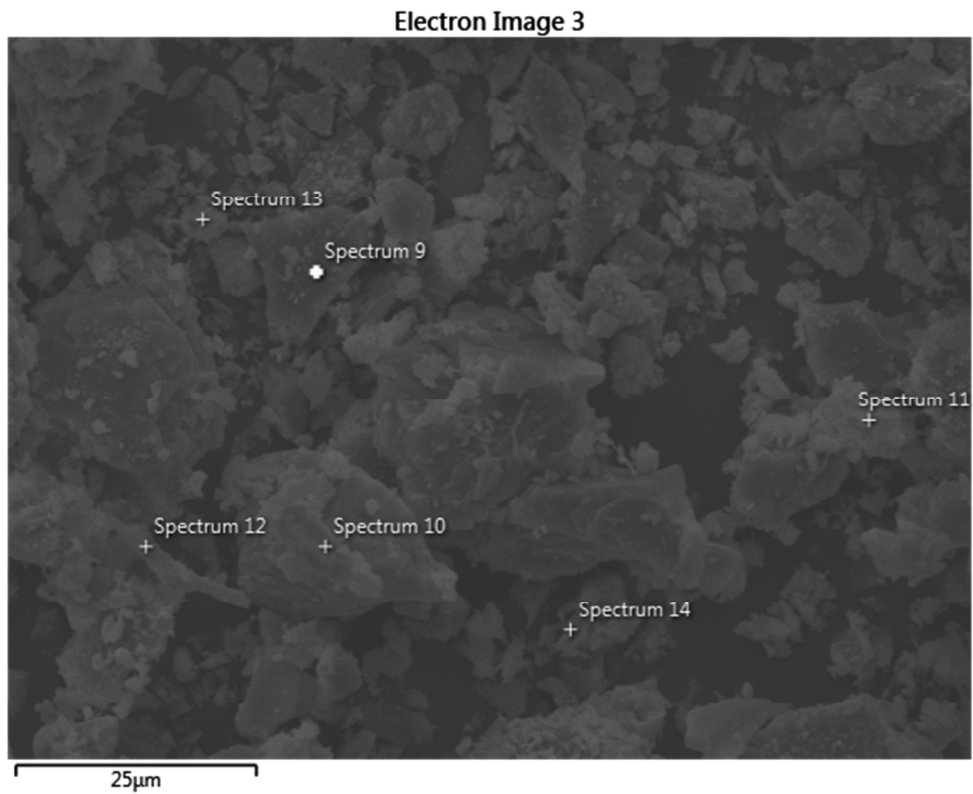
(f) Ampliação 7000X

Fonte: Cosme (2015).

As diferentes regiões em que o ensaio de Espectrometria por Energia Dispersiva (EDS) foi realizado encontram-se indicadas na Figura 18. Dos resultados

apresentados na Tabela 10, observa-se a predominância no RBRO do Oxigênio (O), seguida do Cálcio (Ca) e do Silício (Si), confirmando os resultados encontrados através da espectrometria de fluorescência de raios X.

Figura 18 – Regiões de análise no EDS para o RBRO



Fonte: Cosme (2015).

Tabela 10 – Resultado da análise química do EDS para o RBRO

	O	Ca	Si	C	Fe	Al	Mg	Cu	Cr
Espectro 9	41,9	40,1	9,0	5,0	1,6	0,8	0,5	1,0	0,4
Espectro 10	43,5	36,9	9,6	5,9	1,5	1,2	0,9	0,6	-
Espectro 11	35,3	41,7	10,2	-	4,5	4,0	2,7	1,6	-
Espectro 12	59,1	16,5	2,7	17,8	1,4	1,4	0,5	-	-
Espectro 13	35,6	41,9	11,2	-	3,6	3,8	1,9	2,0	-
Espectro 14	33,4	48,2	7,8	-	4,3	2,8	1,5	1,3	0,7

Fonte: Cosme (2015).

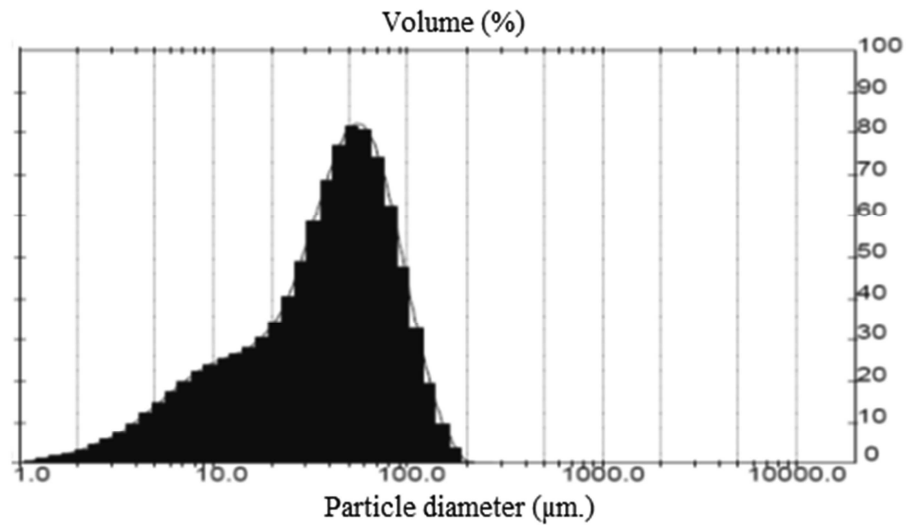
3.1.4 Escória Moída de Aciaria (EMA)

Para a presente pesquisa foi utilizada a Escória de Aciaria LD com Redução de Expansão - ACERITA®, cedida pela empresa Arcelor Mittal, localizada na Serra (ES). Da mesma forma que o RBRO, a EMA foi a mesma utilizada por Gottardi (2015) e Cosme (2015).

A ACERITA® coletada foi primeiramente submetida a um processo de secagem em estufa à 105°C, em seguida foi moída no moinho de argolas para a redução do diâmetro de suas partículas, peneirada na peneira #200 (0,075mm), homogeneizada, quarteada e estocada em sacos plásticos.

No ensaio de massa específica real o valor obtido foi de 3,425 g/cm³. O que se pode observar do ensaio de difratometria a laser (Figura 19) é que as partículas de EMA possuem diâmetro entre 100,0 µm e 1,0µm, onde a sua maior concentração (aproximadamente 80% do volume) encontra-se no diâmetro de 70µm.

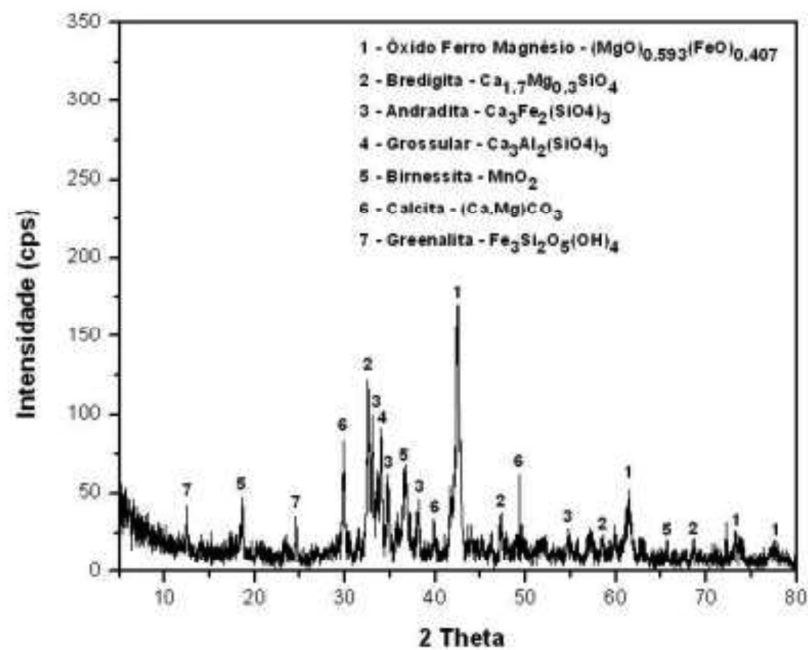
Figura 19 - Diâmetro das partículas de EMA



Fonte: Gottardi (2015).

Na Figura 20 são apresentados os compostos químicos mais comuns encontrados na EMA obtidos através do ensaio de Difração de Raio X.

Figura 20 – Características mineralógicas das partículas de EMA



Fonte: Cosme (2015).

Tabela 11 - Análise química semiquantitativa de EMA

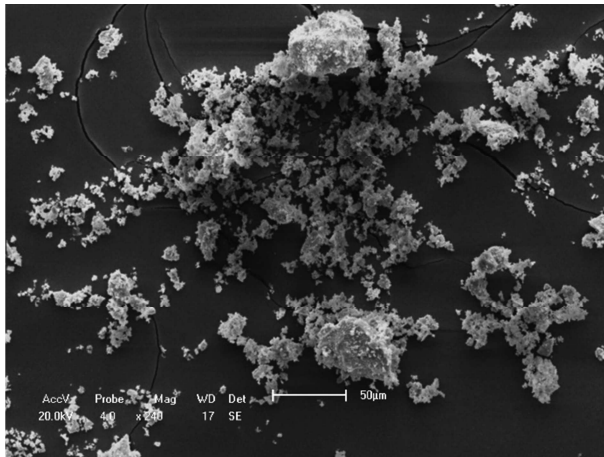
EMA	
Óxidos	(%)
CaO	36,78
Fe ₂ O ₃	24,36
SiO ₂	14,17
MgO	11,54
Al ₂ O ₃	7,55
MnO	3,83
P ₂ O ₅	0,94
TiO ₂	0,38
Cr ₂ O ₃	0,16
SO ₃	0,14
SrO	0,10
Nb ₂ O ₅	0,02
CuO	0,02
NiO	0,01
P.F.	N.A*

Fonte: Cosme (2015).

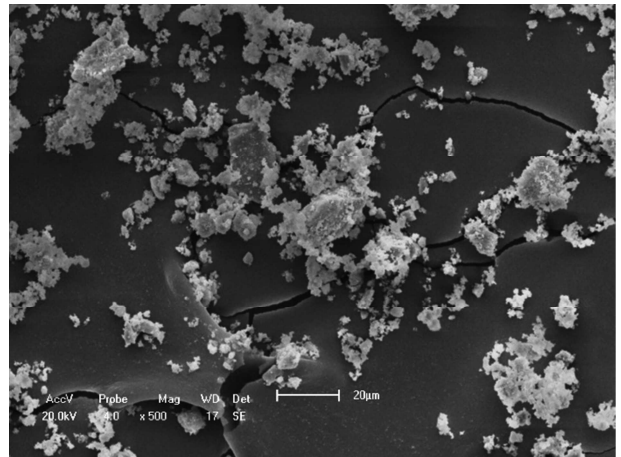
Na Tabela 11 são apresentados os resultados da análise semiquantitativa do resíduo. Observa-se uma maior quantidade de óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de silício (SiO₂). Segundo Cosme (2015), o óxido de ferro presente no resíduo contribui para um maior enrijecimento da mistura asfáltica, que pode contribuir para a formação de trincas no revestimento asfáltico se este estiver submetido a condições de baixa temperatura.

A micrografia da EMA apresentada na Figura 21 mostra que o resíduo possui grãos em formato anguloso e textura áspera, podendo contribuir para o intertravamento dos grãos.

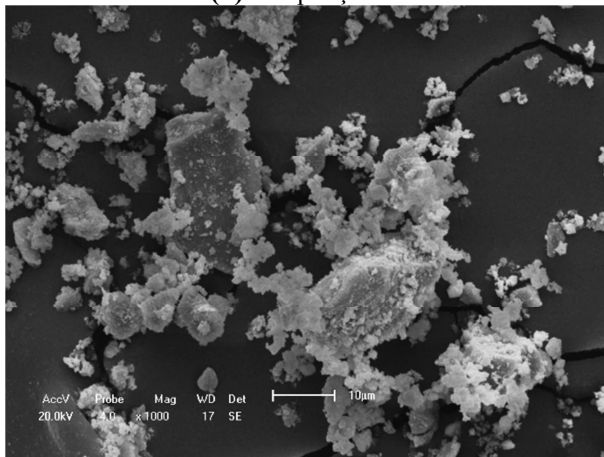
Figura 21 – Micrografia da EMA



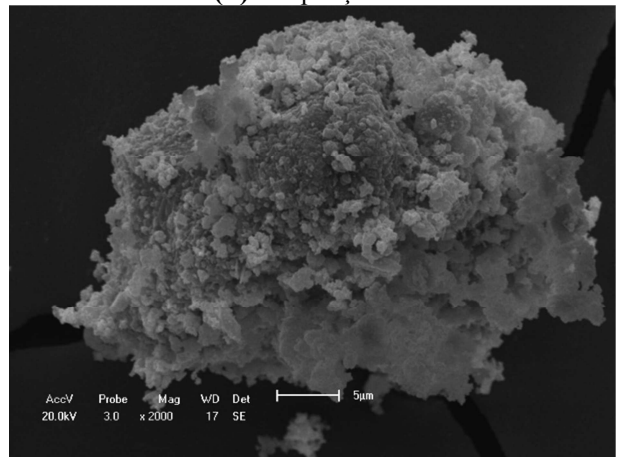
(a) Ampliação 240X



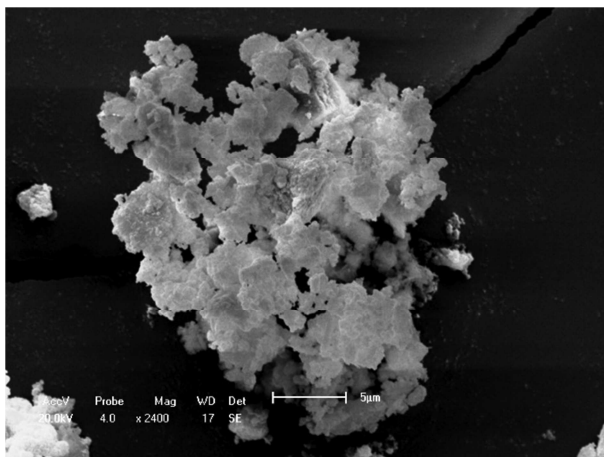
(b) Ampliação 500X



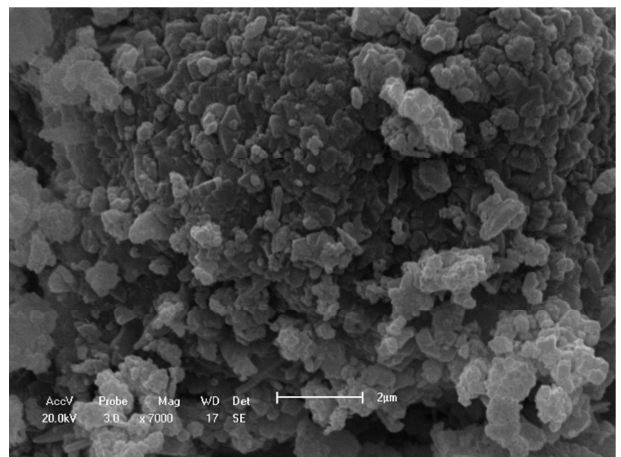
(c) Ampliação 1000X



(d) Ampliação 2000X



(e) Ampliação 2400X



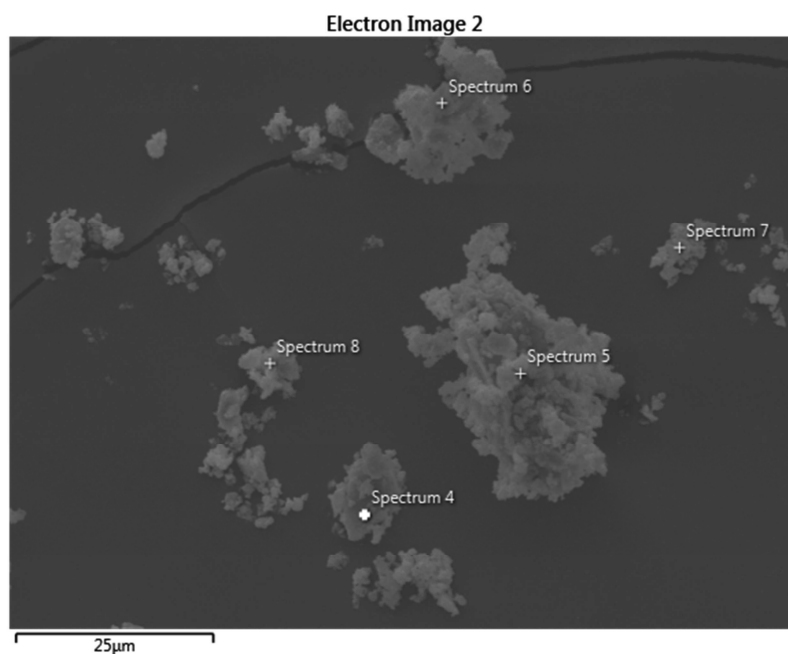
(f) Ampliação 7000X

Fonte: Cosme (2015).

Assim como o resultado encontrado para o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X, na análise química feita através do EDS (Figura 22 e

Tabela 12) percebe-se que a EMA é constituída principalmente de Oxigênio (O), seguido de Carbono (C) e Cálcio (Ca).

Figura 22 - Regiões de análise no EDS para a EMA



Fonte: Cosme (2015).

Tabela 12 - Resultado da análise química do EDS para a EMA

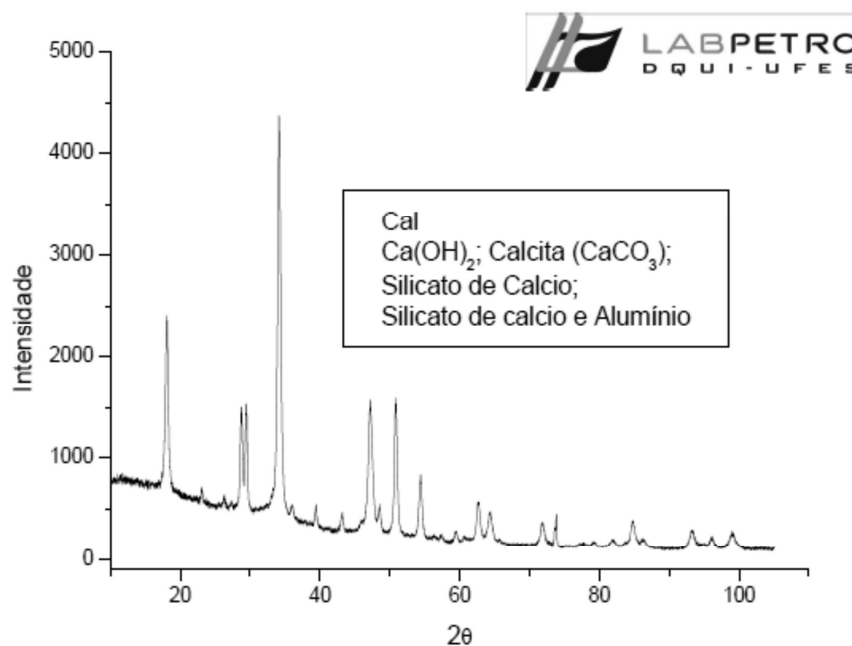
	O	C	Ca	Fe	Cu	Si	Mg	Cr	Al
Espectro 4	59,2	18,7	14,7	3,8	1,3	1,3	0,4	0,4	0,4
Espectro 5	64,6	22,2	6,2	3,6	1,0	0,8	0,3	0,3	0,3
Espectro 6	65,3	22,7	4,4	4,5	1,0	0,6	0,5	0,4	0,3
Espectro 7	67,0	23,8	3,4	3,0	1,0	0,4	0,4	0,3	0,3
Espectro 8	67,0	23,9	3,9	3,6	1,2	0,4	-	-	-

Fonte: Cosme (2015).

3.1.5 Cal

A Cal hidratada utilizada foi a da marca Massical, onde foi submetida a secagem em estufa à 105 °C e estocada em sacos plásticos. No ensaio de massa específica real o valor obtido foi de 2,293 g/cm³. Foi feita também a análise mineralógica por difração de raio X na Cal apresentada na Figura 23, onde nota-se a presença em maior quantidade de Calcita, seguida dos Silicatos de cálcio e alumínio.

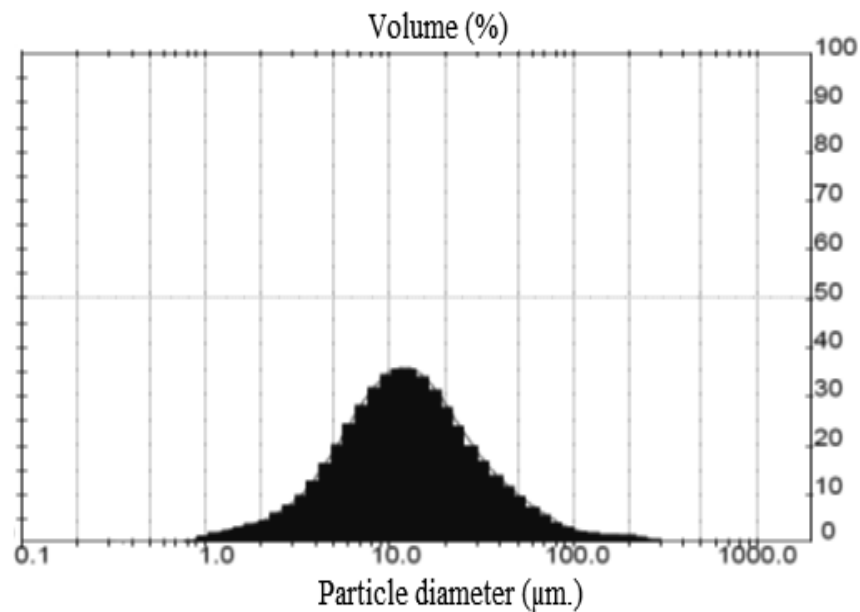
Figura 23 - Características mineralógicas das partículas da Cal



Fonte: Gottardi (2015).

O ensaio de difratometria a laser realizado na Cal e apresentado na Figura 24 demonstra que suas partículas estão entre 100,0 µm e 1,0µm onde a sua maior concentração (aproximadamente 35% do volume) encontra-se no diâmetro de 10,0 µm, o que indica que este material possivelmente irá atuar como um fíler ativo, modificando as propriedades do CAP.

Figura 24 - Diâmetro das partículas da Cal



Fonte: Gottardi (2015).

De acordo com os resultados apresentados para este ensaio é possível afirmar que os diâmetros das partículas de Cal são os menores (10 μm), já os das partículas de EMA são de maior diâmetro (70 μm), enquanto que os diâmetros das partículas de RBRO são intermediários (40 μm).

3.2 DEFINIÇÃO DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS MAF'S

As proporções de materiais utilizadas na produção das MAF's foram definidas a partir da dosagem de Misturas Asfálticas Completas (MAC) utilizadas por Gottardi (2015). As composições granulométricas para a MAC de referência e para a MAC com substituição de 2% de fíler encontram-se na Tabela 13 e Tabela 14, respectivamente.

Tabela 13 - Distribuição granulométrica da MAC de referência

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO								
		PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%)						FAIXA C - DNIT		
SÉRIE	ABERTURA	B1	B0	GRANILHA	PÓ PEDRA	FÍLER	MISTURA	LIMITE		TOLERÂNCIAS DA FAIXA
ASTM	(mm)	13,70%	22,50%	19,60%	44,20%	0%	SEM FÍLER ARTIFICIAL	INFERIOR	SUPERIOR	
1"	25,4	100	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
¾"	19,1	100	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
½"	12,5	37,9	100	100	100	100	91,5	80	100	± 7
3/8"	9,5	13,1	88,5	92,2	100	100	84,0	70	90	± 7
Nº 4	4,8	6,8	18,5	44	98,9	100	57,4	44	72	± 5
Nº 10	2	5,3	4,4	23,3	80,7	100	42,0	22	50	± 5
Nº 40	0,42	3,6	2,2	11,4	39,7	100	20,8	8	26	± 5
Nº 80	0,18	2,4	1,4	6,9	20	100	10,8	4	16	± 3
Nº 200	0,075	1,4	0,8	3,1	8,3	100	4,6	2	10	± 2

Fonte: Gottardi (2015).

Tabela 14- Distribuição granulométrica da MAC com substituição de 2% de filer

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO								
		PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%)						FAIXA C - DNIT		
SÉRIE	ABERTURA	B1	B0	GRANILHA	PÓ PEDRA	FÍLER	MISTURA	LIMITE		TOLERÂNCIAS DA FAIXA
ASTM	(mm)	13,43%	22,05%	19,21%	43,32%	2%	COM 2%	INFERIOR	SUPERIOR	
1"	25,4	100	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
¾"	19,1	100	100	100	100	100	100,0	100	100	± 7
½"	12,5	37,9	100	100	100	100	91,7	80	100	± 7
3/8"	9,5	13,1	88,5	92,2	100	100	84,3	70	90	± 7
Nº 4	4,8	6,8	18,5	44	98,9	100	58,3	44	72	± 5
Nº 10	2	5,3	4,4	23,3	80,7	100	43,1	22	50	± 5
Nº 40	0,42	3,6	2,2	11,4	39,7	100	22,4	8	26	± 5
Nº 80	0,18	2,4	1,4	6,9	20	100	12,6	4	16	± 3
Nº 200	0,075	1,4	0,8	3,1	8,3	100	6,6	2	10	± 2

Fonte: Gottardi (2015).

Não há um consenso sobre a peneira de corte para dosagem das MAF"s. A maioria dos estudos utilizam a peneira nº 16 (abertura de 1,18 mm) da série ASTM. Para a

dosagem das MAF's, optou-se em utilizar a peneira de corte nº 10 (abertura de 2,00 mm).

De posse da composição granulométrica das misturas asfálticas completas foi então possível determinar a composição granulométrica das suas respectivas MAF's, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Distribuição granulométrica dos agregados na MAF de referência

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		MATERIAL RETIDO (%)				
SÉRIE	ABERTURA	B1	B0	GRANILHA	PÓ PEDRA	FÍLER
ASTM	(mm)	13,70%	22,50%	19,60%	44,20%	0%
Nº 40	0,42	0,56	1,18	5,56	43,20	0,00
Nº 80	0,18	0,39	0,43	2,10	20,76	0,00
Nº 200	0,075	0,33	0,32	1,78	12,33	0,00
FUNDO		0,46	0,43	1,45	8,74	0,00
Total		1,73	2,36	10,89	85,02	0,00
		100				

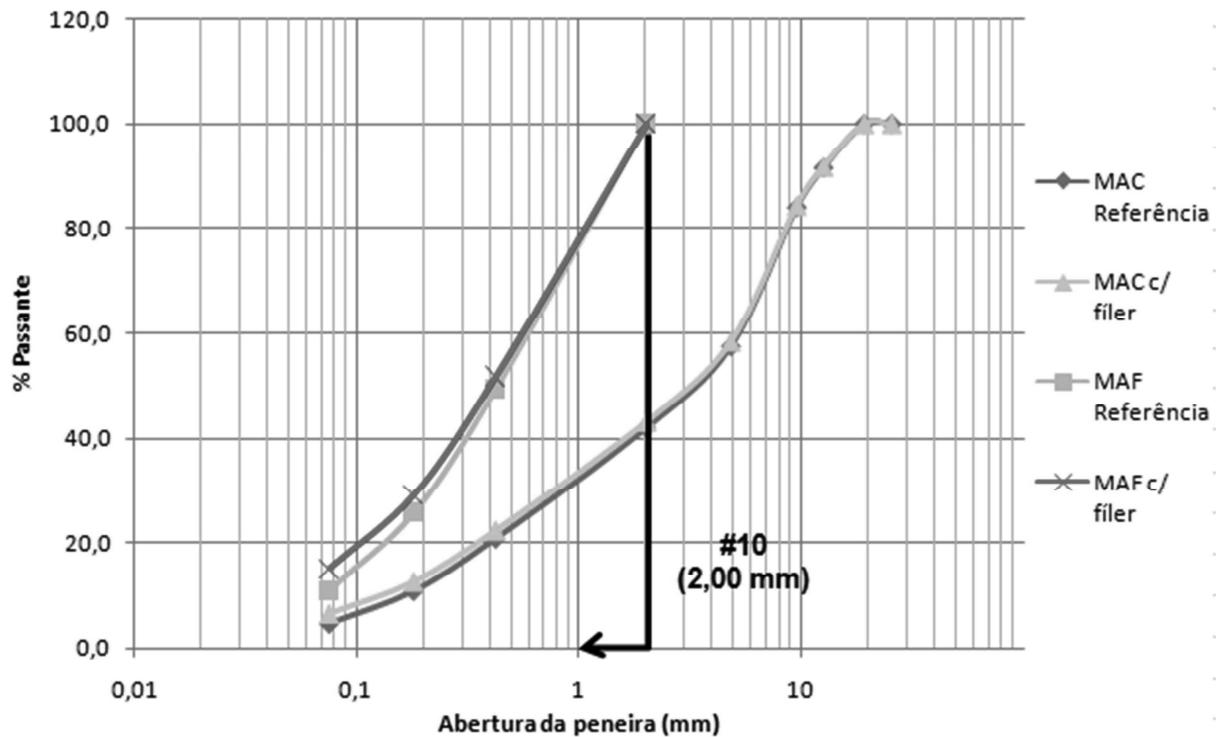
Fonte: Produção da Autora.

Tabela 16 - Distribuição granulométrica dos agregados na MAF com substituição de fíler

PENEIRA DE MALHA QUADRADA		MATERIAL RETIDO (%)				
SÉRIE	ABERTURA	B1	B0	GRANILHA	PÓ PEDRA	FÍLER
ASTM	(mm)					
Nº 40	0,42	0,53	1,13	5,30	41,20	0,00
Nº 80	0,18	0,37	0,41	2,00	19,79	0,00
Nº 200	0,075	0,31	0,31	1,69	11,76	0,00
FUNDO		0,44	0,41	1,38	8,34	4,64
Total		1,65	2,25	10,38	81,08	4,64
		100				

Fonte: Produção da Autora.

Figura 25 - Distribuição granulométrica da MAC e sua respectiva MAF

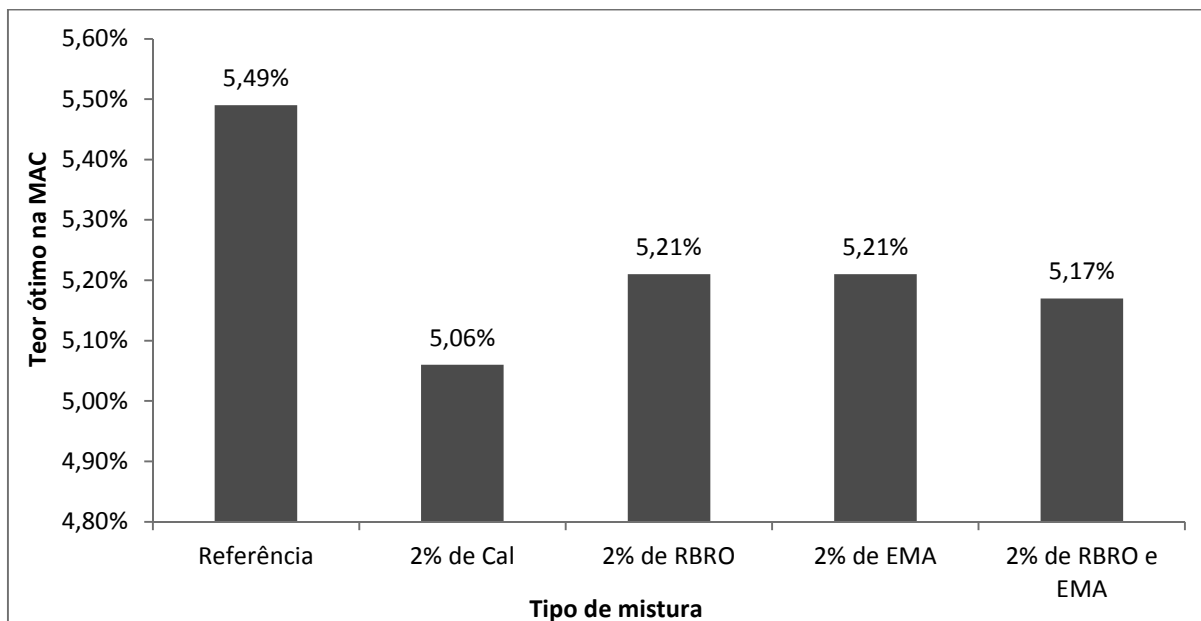


3.3 DOSAGEM DAS MAC'S E MAF'S

3.3.1 Dosagem da MAC

Como já mencionado anteriormente, a dosagem das misturas asfálticas completas foi realizada por Gottardi (2015) e os teores de projeto encontrados para cada tipo de mistura está apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Teor de projeto para cada tipo de mistura



Fonte: Adaptado de Gottardi (2015).

3.3.2 Metodologia de dosagem da MAF

A metodologia para a dosagem da MAF utilizada neste estudo foi desenvolvida por Coutinho (2012), onde a determinação do teor de ligante é feita com base nos ensaios de granulometria de agregados graúdos e miúdos (DNER-ME 035-95) e extração de ligante (DNER-ME 053-94). Conhecendo-se o teor de projeto da mistura asfáltica completa, é preparada uma amostra da MAC com 1.000g de agregados mais o teor de ligante correspondente. A amostra é revolvida constantemente até que se atinja a temperatura ambiente com a finalidade de se evitar a formação de grumos entre os agregados miúdos e o ligante e evitar a aderência dos agregados miúdos nos agregados graúdos. Este procedimento é realizado com o intuito de possibilitar o peneiramento da amostra, separando o agregado graúdo do miúdo, ambos envoltos por mástique. No final do processo obtém-se uma mistura solta que passará pelas seguintes etapas:

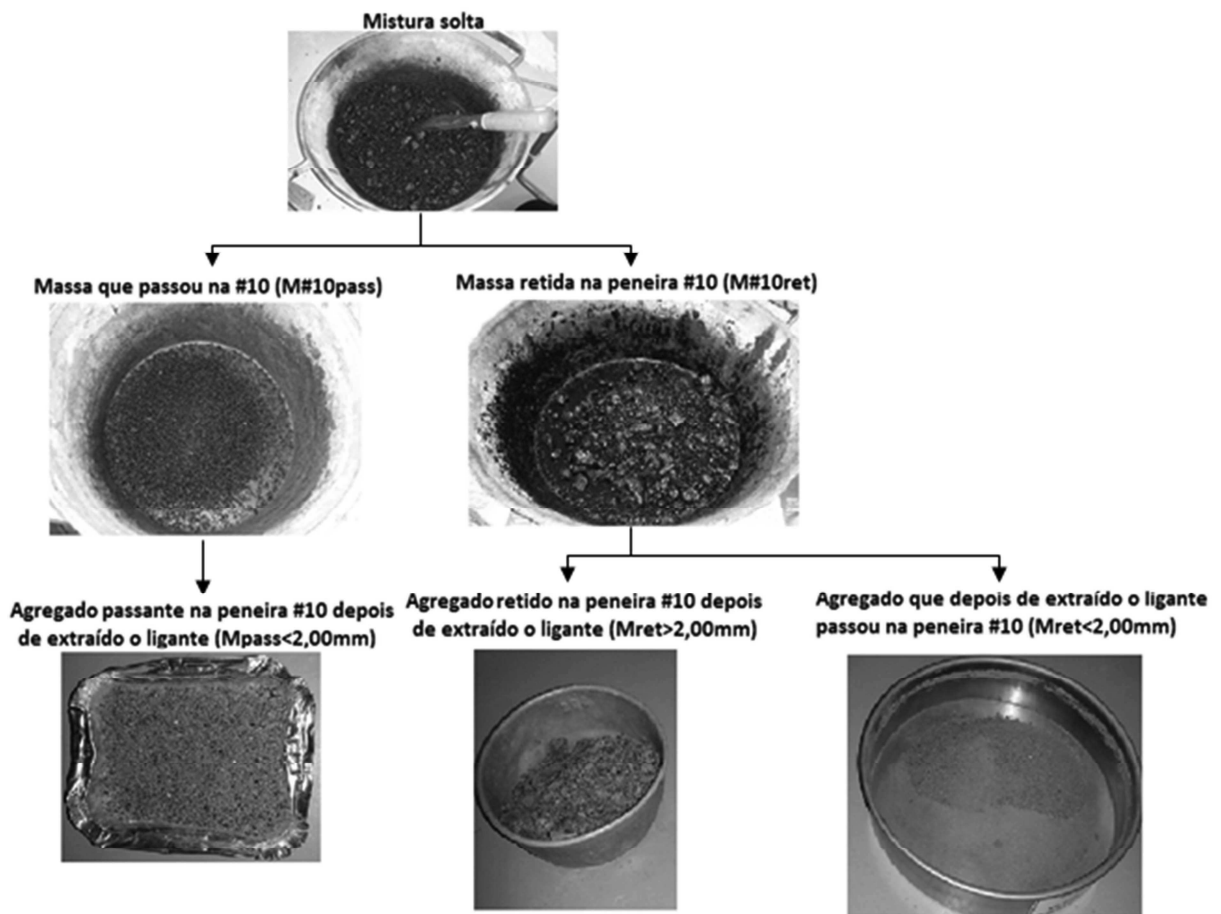
- 1) Peneiramento da amostra solta na peneira previamente definida como tamanho máximo nominal, no caso deste estudo foi definida a peneira de nº10 (2,00 mm), obtendo-se duas massas diferentes: Uma é a massa da mistura que fica retida na peneira #10 ($M_{\#10ret}$), nesta estão presentes os

agregados graúdos envoltos por mástique e agregados miúdos envoltos por ligante e que ficaram aderidos aos agregados graúdos; A outra é a massa da mistura que passa na peneira #10 ($M_{\#10pass}$), que são os agregados miúdos envoltos por mástique.

- 2) Cada massa obtida na etapa anterior terá o seu ligante asfáltico extraído, obtendo-se então a massa de ligante contida nos agregados que passaram na peneira #10 ($M_{ligpass}$) e a massa de ligante contida nos agregados que ficaram retidos na peneira #10 (M_{ligret}). A massa de agregado sem ligante que passou na peneira #10 ($M_{pass<2,00mm}$) é encontrada pela diferença entre a massa total ($M_{\#10pass}$) e a massa de ligante ($M_{ligpass}$) contidas na porção passante na peneira #10.
- 3) Peneiramento da massa de agregados que ficaram retidos na peneira #10 obtendo-se a massa de agregados graúdos ($M_{ret>2,00mm}$) e a massa de agregados miúdos que ficaram aderidos aos agregados graúdos ($M_{ret<2,00mm}$).

A Figura 27 ilustra a execução do procedimento descrito nas etapas anteriormente explicadas.

Figura 27 – Procedimento para dosagem da MAF



Fonte: Acervo da Autora.

O objetivo é encontrar o teor de ligante que envolve apenas os agregados passantes na peneira #10. Para isso deve-se calcular o teor de ligante presente na porção que passou na peneira #10 no primeiro peneiramento através da Equação (20):

$$T_{maf} = \frac{\text{Massa de ligante passante na \#10}}{\text{Massa de ligante + agregado passante na \#10}} = \frac{M_{ligpass}}{M_{\#10pass}} \quad (20)$$

Porém, observa-se que mesmo após o peneiramento, parte dos agregados miúdos ficam aderidos aos agregados graúdos. Estes devem ser considerados no cálculo do teor de ligante. Para isso, é necessário então encontrar a massa de ligante que fica em volta destes agregados miúdos aderidos aos graúdos.

Desta forma, é considerado que estes agregados possuem o mesmo teor de ligante encontrado para T_{maf} . A massa de ligante presente nos agregados miúdos que ficaram aderidos aos graúdos pode ser calculada de acordo com a Equação (21):

$$M_{\text{lig}<2,00\text{mm}} = (T_{\text{maf}} \times M_{\text{ret}<2,0\text{mm}}) / (1 - T_{\text{maf}}) \quad (21)$$

Finalmente, o teor de ligante corrigido presente na MAF pode ser calculado através da divisão entre o total de ligante que envolve os agregados passantes na #10 e o total de massa de agregados + ligantes passantes na #10, apresentado na Equação (22).

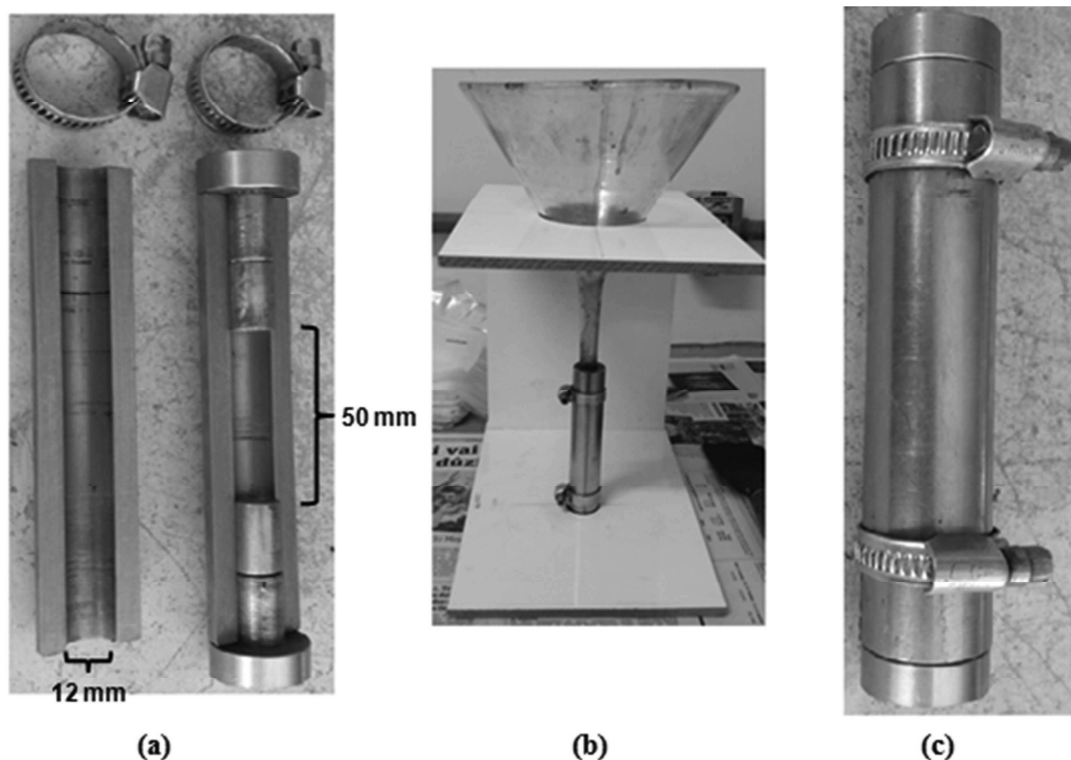
$$\% \text{lig na MAF} = \frac{M_{\text{lig}<2,00\text{mm}} + M_{\text{ligpass}}}{(M_{\text{pass}<2,00\text{mm}} + M_{\text{ret}<2,0\text{mm}} + M_{\text{ligpass}} + M_{\text{lig}<2,00\text{mm}})} \times 100 \quad (22)$$

3.4 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS DE MAF PARA ENSAIOS OSCILATÓRIOS

Para a moldagem dos corpos-de-prova foi fabricado um molde em aço que permitia que a dimensão final do corpo de prova fosse exatamente a desejada (50 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro).

A massa de MAF necessária para produzir cada corpo-de-prova com volume de vazios de $9,5 \pm 0,5$ % variava de acordo com o tipo de mistura, mas em média possuía 12,5 g. Devido a pouca massa necessária para a produção de um corpo de prova, percebeu-se que na hora da mistura entre os agregados e o ligante, estes perdiam calor muito rapidamente, dificultando ou até mesmo impossibilitando a completa mistura e homogeneização dos componentes. Dessa forma, decidiu-se preparar uma amostra de 500g de MAF, obtendo-se uma mistura solta. Posteriormente, era pesada exatamente a massa da mistura necessária para a moldagem de um corpo de prova, levada a estufa por 1 hora na temperatura de compactação e em seguida colocada dentro do molde e compactada. A Figura 28 (a) apresenta o molde utilizado, na Figura 28 (b) é ilustrado o molde já preparado para receber a mistura de MAF e a Figura 28 (c) é o molde já com a mistura compactada em seu interior.

Figura 28 – Molde para fabricação das amostras de MAF's



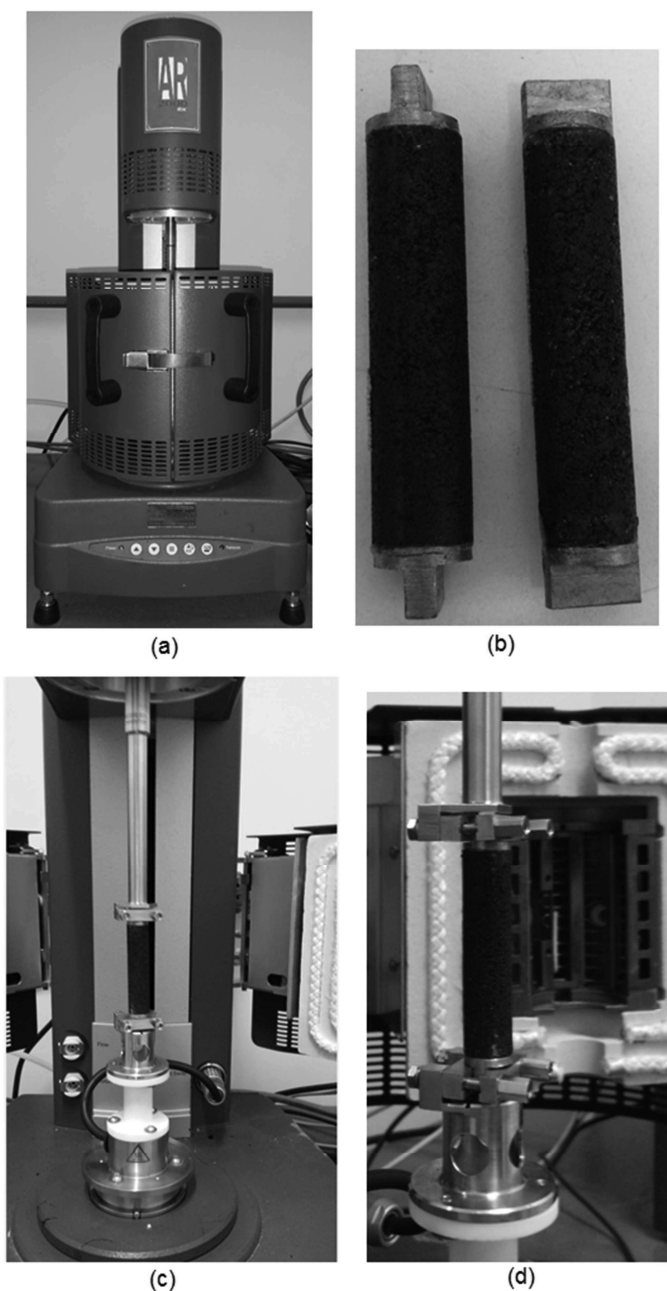
Fonte: Acervo da Autora.

A compactação da mistura se deu de forma manual, onde as duas peças que encaixam nas extremidades do molde eram pressionadas ao mesmo tempo. A desmoldagem era feita com aproximadamente 30 minutos depois, quando o molde já tinha sido resfriado o suficiente para ser manuseado com as mãos, mas ainda estava morno, para facilitar na retirada da mistura.

Para a realização dos ensaios oscilatórios (ensaio de varredura de frequência e ensaio de varredura de tempo) foi utilizado um reômetro de cisalhamento dinâmico modelo AR 2000ex (TA instruments) apresentado na Figura 29 (a). Este reômetro é capaz de aplicar torques de $0,3 \mu\text{N.m}$ até 200 mN.m , frequências entre $7,5 \text{ E}^{-7}$ e 628 rad/s , velocidade angular de 0 a 300 rad/s e força normal de 0,005 a 50 N .

Nas extremidades das amostras de MAF foram coladas peças metálicas de aço para fixação das amostras no interior do reômetro (Figura 29 (a), (b) e (c)). Vale ressaltar que essas peças metálicas devem ser coladas de forma que fiquem alinhadas, pois caso contrário, seu encaixe no reômetro pode ficar comprometido resultando em interferências nos resultados dos ensaios.

Figura 29 – Reômetro de cisalhamento e MAF's acopladas em seu interior



Fonte: Acervo da Autora.

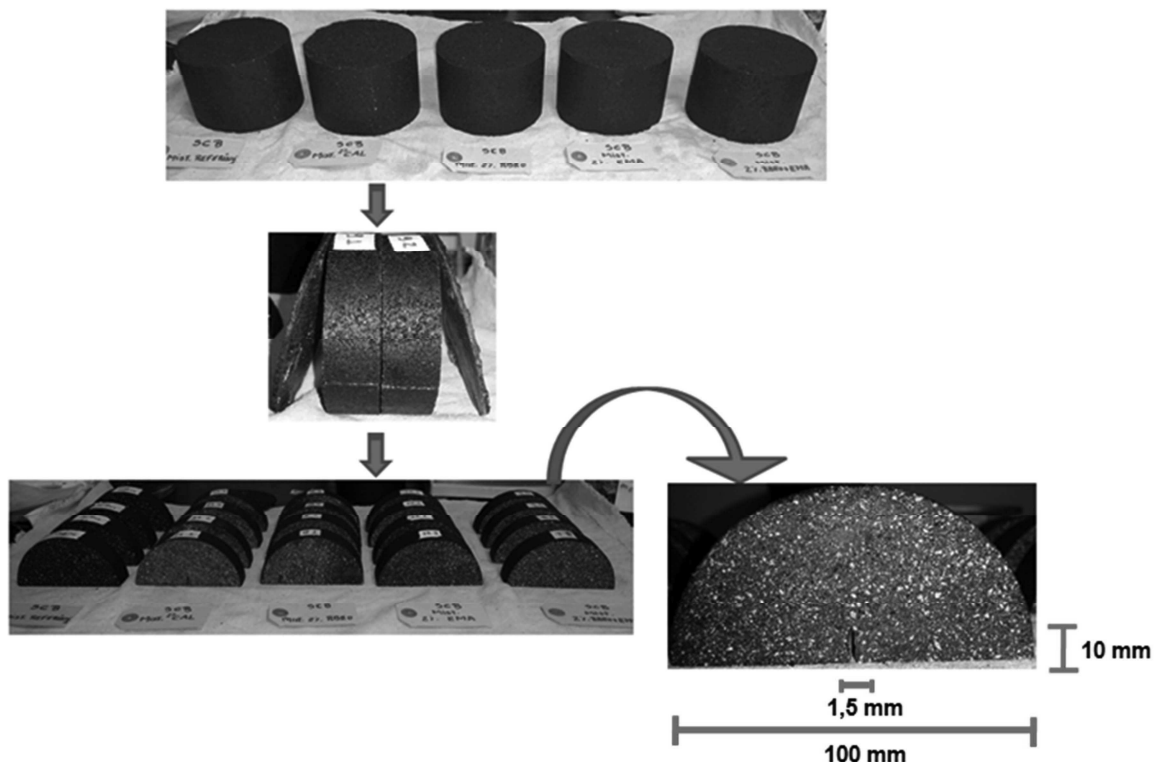
3.5 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS SEMICIRCULARES DE MAF PARA ENSAIO DE FRATURA

Os corpos de prova para os cinco tipos de misturas de MAF estudadas foram preparados utilizando o compactador Marshall. Para se atingir o volume de vazios especificado ($9,5 \pm 0,5\%$), variava-se o número de golpes nas duas faces do CP para cada mistura, obtendo-se CP's com dimensões de 100 mm de diâmetro e altura

variável, com aproximadamente 70 mm. Em seguida, uma camada do topo e da base de cada CP foi serrada, pois acredita-se que tenha uma pequena variação de volume de vazios entre as extremidades e o interior do CP e também para fins de regularização das bordas das amostras. Cada CP Marshall foi serrado longitudinalmente e de cada um foi originado quatro amostras semicirculares com a mesma espessura (2,5 cm) utilizada por Aragão (2011) e Lutfi (2011), porém com diâmetro de 10 cm. As serragens desta etapa foram feitas por um disco diamantado de serra circular, de espessura de 4 mm, com injeção de água para minimizar os danos.

Em cada amostra semicircular foi feito um entalhe que desempenha a função de uma pré-trinca, onde o maior ponto de concentração de tensão é conhecido e guiará a propagação do trincamento. A serra de ferro manual foi utilizada para fazer o entalhe que tinha 1,5 mm de espessura e 10 mm de comprimento. O procedimento de produção das amostras está ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Produção de amostras semicirculares para ensaio SCB



Fonte: Acervo da Autora.

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS NAS MAF'S

3.6.1 Ensaio de caracterização viscoelástica linear

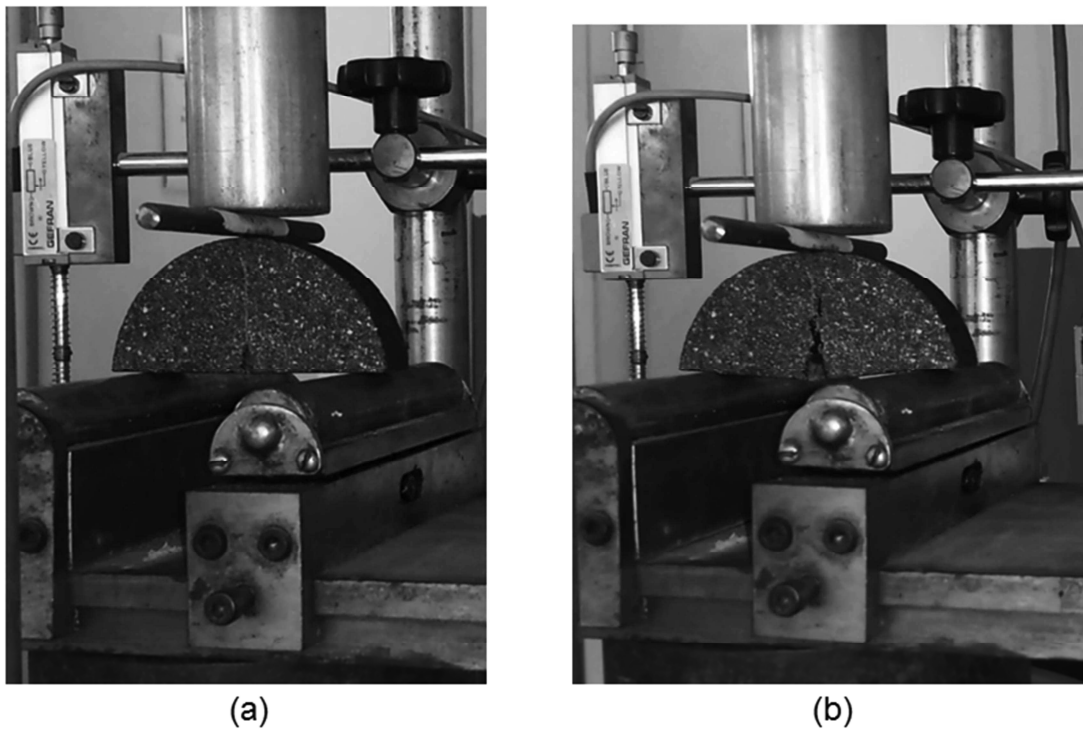
A caracterização do comportamento viscoelástico linear dos cinco tipos de MAF's estudadas neste trabalho foi feita através da realização do ensaio de varredura de frequência. As propriedades viscoelásticas lineares do material, como o módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ), foram obtidas através do experimento aplicando-se tensões de cisalhamento oscilatórias nos corpos de prova. Para cada mistura foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 50 mm de altura e 12 mm de diâmetro. O ensaio foi conduzido nas frequências de 25 a 0,01 Hz, nas temperaturas de 25, 40 e 55°C com deformação controlada e amplitude de deformação de 65 $\mu\epsilon$. Esse nível de deformação é baixo o suficiente para garantir que o material não sofrerá dano durante o ensaio e foi escolhido de acordo com o utilizado em outros estudos (FREIRE, 2015; SOUSA et al., 2013; SOUSA, 2010; ZOLLINGER, 2005; KIM, 2003).

3.6.2 Ensaio de fratura em corpo-de-prova com geometria semi-circular– SCB

O ensaio SCB foi realizado na prensa eletrônica da marca CONTENCO em três amostras para cada mistura, onde foi aplicado um carregamento monotônico através de um friso metálico no centro da amostra para garantir a distribuição de carga por toda a amostra, a uma taxa de deslocamento de 0,83 mm/s na temperatura ambiente (25 \pm 1°C).

A prensa foi adaptada com uma peça metálica com apoios cilíndricos que podiam rotacionar enquanto a amostra era carregada. Nesta peça era possível regular a distância entre os apoios, que foi fixada em 80 mm. Esta distância foi escolhida para que se mantivesse a proporcionalidade entre o diâmetro do CP utilizado e a distância entre os eixos dos roletes, onde para CP's feitos no compactador giratório SUPERPAVE, que são os mais comumente utilizados, a distância entre os roletes (120 mm) representa 80% de seu diâmetro (150 mm). A Figura 31 exibe as amostras no início e no término do ensaio.

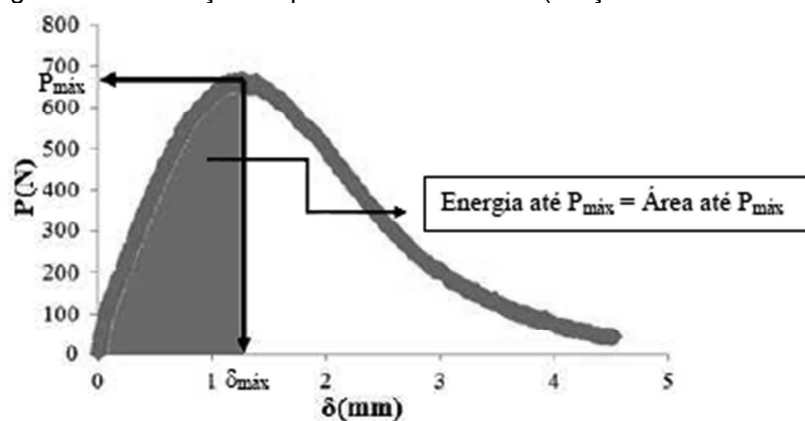
Figura 31 - Amostra semicircular no início e no fim do ensaio SCB



Fonte: Acervo da Autora.

Com a obtenção dos resultados do ensaio, o desempenho das diferentes MAF's pode ser avaliado utilizando parâmetros que são obtidos diretamente da curva Força (N) x Deslocamento (mm). Estes parâmetros são (i) carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$), ii) o deslocamento no ponto de carga máxima ($\delta_{m\acute{a}x}$) e iii) a energia dissipada até o ponto de carga máxima, $EP_{m\acute{a}x}$ (Freire, 2013). Como ilustrado na Figura 32, a energia dissipada pode ser obtida através da área sob a curva Força x Deslocamento.

Figura 32 – Obtenção de parâmetros da curva (Força x Deslocamento)



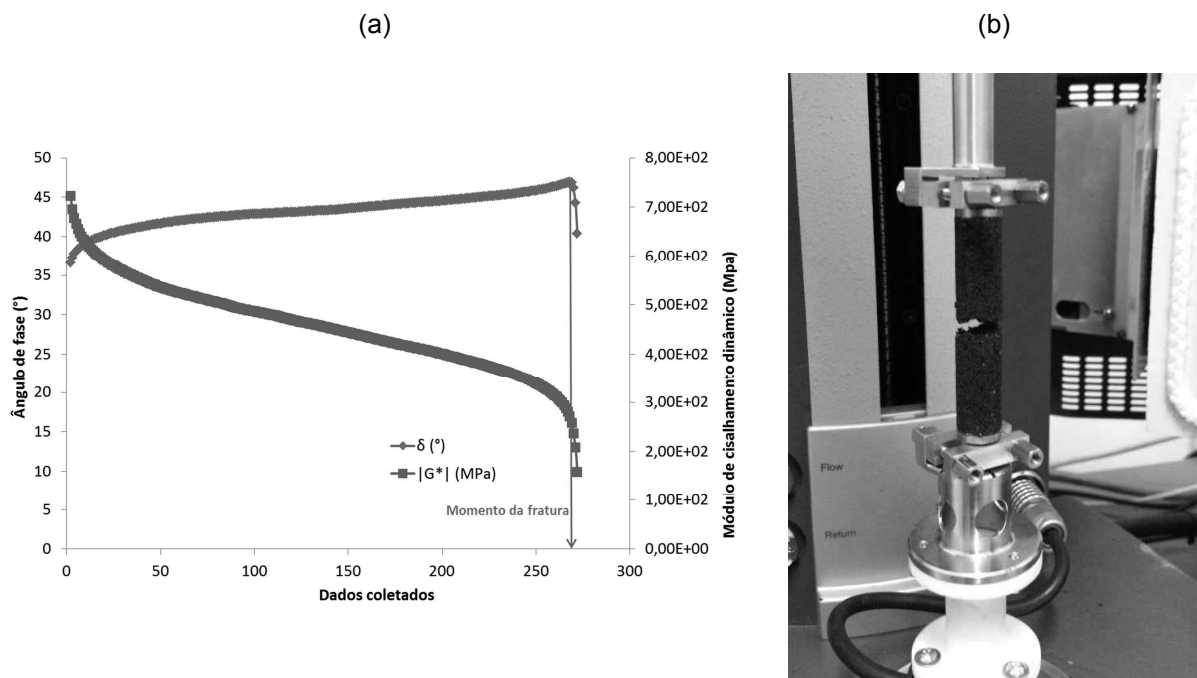
Fonte: Freire (2013).

3.6.3 Ensaio de varredura de tempo

A caracterização do dano por fadiga nas MAF's foi realizada a partir do ensaio de varredura de tempo à tensão controlada de 300 KPa. Todas as amostras foram ensaiadas no reômetro de cisalhamento e foram submetidas ao carregamento torsional de forma senoidal, na frequência de 10 Hz e na temperatura de 25°C. Esta temperatura foi escolhida, pois foi a mesma já utilizada por outros autores devido a limitações do equipamento para o mesmo tipo de ensaio em MAF's (COUTINHO, 2012; FREIRE, 2015) e também para que as amostras estivessem na mesma condição de temperatura do ensaio SCB para posteriores comparações de resultados. O tempo total do teste era de 24 horas, mas assim que a amostra atingisse o critério de ruptura o ensaio era finalizado.

O critério de ruptura considerado foi a fratura completa da amostra. Foi utilizada para a identificação da fratura a queda acentuada do ângulo de fase, exemplificada na Figura 33 (a).

Figura 33 – Critério de ruptura da amostra ensaiada



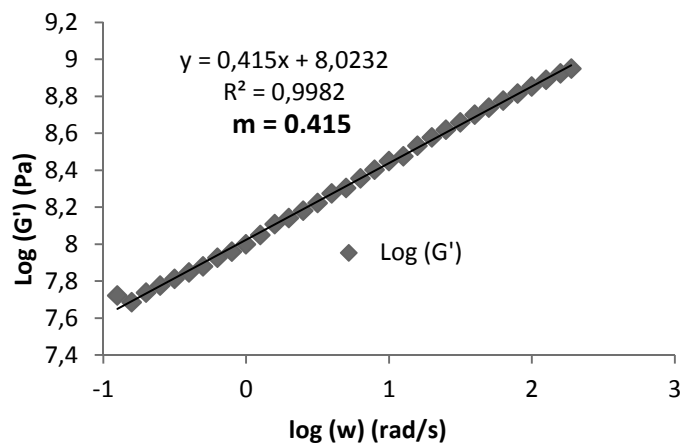
Fonte: Acervo da autora

Para que o teste fosse considerado válido, as amostras tinham que apresentar a ruptura na faixa central da amostra (Figura 33 (b)), pois rupturas que se

apresentavam nas extremidades, na realidade estavam relacionadas ao desempenho da cola utilizada (cola epoxy) para fixação das bases metálicas na MAF.

Para que fosse possível a obtenção do módulo dinâmico de cisalhamento inicial ($|G^*|$) sem dano de cada amostra e do parâmetro α (onde $\alpha = 1/m$), foi necessária a realização do ensaio de varredura de frequência antes do ensaio de varredura de tempo, exemplificado na Figura 34. Esta varredura de frequência foi conduzida na temperatura de 25°C, com frequência variando de 0,01 a 25 Hz e amplitude de deformação de 60 $\mu\epsilon$.

Figura 34 - Ensaio de varredura de frequência para obtenção de m



Fonte: Acervo da autora

A etapa seguinte, chamada de tempo de condicionamento, consistiu em um tempo de “descanso” para a amostra de 30 minutos, para evitar a influência do carregamento (mesmo que muito baixo) aplicado no ensaio de varredura de frequência e assim não interferir nos resultados do ensaio seguinte, de varredura de tempo.

De posse dos dados coletados no ensaio de varredura de tempo, com auxílio do Excel, os parâmetros do modelo simplificado do dano contínuo viscoelástico puderam ser calculados e comparados através das curvas características de dano (CxS), entre os diferentes tipos de MAF's.

4 RESULTADOS

4.1 DOSAGEM DA MAF

Conforme mencionado no capítulo anterior, a dosagem das MAF's seguiu metodologias utilizadas em pesquisas de MAF no Brasil (COUTINHO, 2012; FREIRE, 2015). Assim, determinaram-se os teores de ligantes para cada uma das cinco tipos de misturas asfálticas analisadas. Para cada mistura, foram realizadas duas repetições do procedimento de dosagem, sendo estabelecido o teor de ligante como sendo a média de valores das amostras, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultado da dosagem das MAF's

Mistura	Peneira de corte		Teor de ligante no CA (%)	Teor de ligante na MAF (%)	Incremento de ligante do CA para MAF (%)	Coeficiente de variação (%)
	Série (#)	Abertura (mm)				
MAF_REF	10	2,00	5,49	9,68	76	0,36
MAF_CAL	10	2,00	5,06	8,89	76	1,65
MAF_RBRO	10	2,00	5,21	9,53	83	0,35
MAF_EMA	10	2,00	5,21	9,19	76	1,56
MAF_RBRO +EMA	10	2,00	5,17	9,19	78	0,80

Fonte: Acervo da autora

Como já esperado, o teor de ligante utilizado nas MAF's é superior ao utilizado no concreto asfáltico, já que as partículas dos agregados na matriz são menores e, portanto, sua área de superfície específica é maior, necessitando de mais ligante para recobrir os agregados (KARKI, 2010). Também é possível concluir que a mistura com fíler de cal necessita de um menor teor de ligante devido ao tamanho médio de suas partículas ser bem menor que o tamanho médio das partículas dos resíduos de RBRO e EMA, como mostrado na análise granulométrica destes materiais. Ao se comparar o teor de ligante encontrado nas MAF's com os dos CA's percebe-se que a proporcionalidade e ranqueamento dos diferentes tipos de misturas se mantiveram, ou seja, a mistura com maior teor de ligante no CA é também aquela na MAF, demonstrando a eficácia do método de dosagem adotado. Um fator interessante a ser observado é o incremento no teor de ligante do CA em comparação ao obtido para as MAF's, que se mostrou independente do tipo de fíler neste estudo. Para todas as misturas foi observado um incremento de $77 \pm 1\%$ no

teor de ligante da MAF em relação àqueles do CA, com exceção da mistura com RBRO que apresentou um incremento de 83%.

Com relação ao método de dosagem utilizado, foi observado que o procedimento pode sofrer pequena influência do operador. Contudo, o coeficiente de variação encontrado foi menor que 2%, mostrando que o procedimento de dosagem utilizado tem pequena variabilidade, i.e., boa repetibilidade, além de ser facilmente desenvolvido em laboratório, pois utiliza equipamentos já comumente empregados para o controle tecnológico de misturas asfálticas.

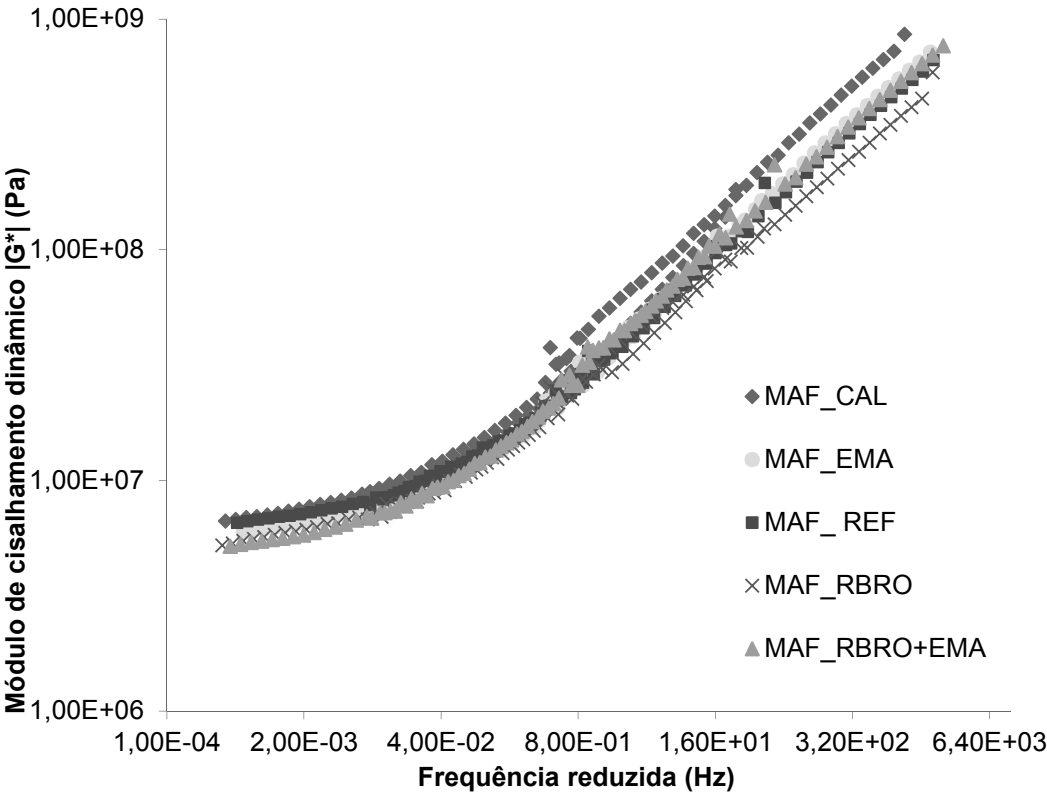
4.2 CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA LINEAR DAS MAF'S

O comportamento viscoelástico linear das cinco MAF's estudadas é verificado através da análise curvas mestres do Módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do Ângulo de fase (δ) à temperatura de referência de 40°C, obtidas após a realização do ensaio de varredura de frequência.

De posse das curvas mestras é possível interpretar que o comportamento do material a baixas frequências representa o seu comportamento a altas temperaturas ou a uma baixa velocidade de carregamento/tráfego, enquanto que a altas frequências representam o comportamento do material a baixas temperaturas ou alta velocidade de carregamento/tráfego. Portanto, para reduzir o potencial a deformação permanente de misturas asfálticas, o comportamento ideal da mistura seria um maior valor de $|G^*|$ (maior rigidez) para altas temperaturas, onde a suscetibilidade a deformação permanente é maior, e um menor de $|G^*|$ (menor rigidez) para baixas temperaturas. Além disso, quanto maior o ângulo de fase (δ), maior o retorno elástico.

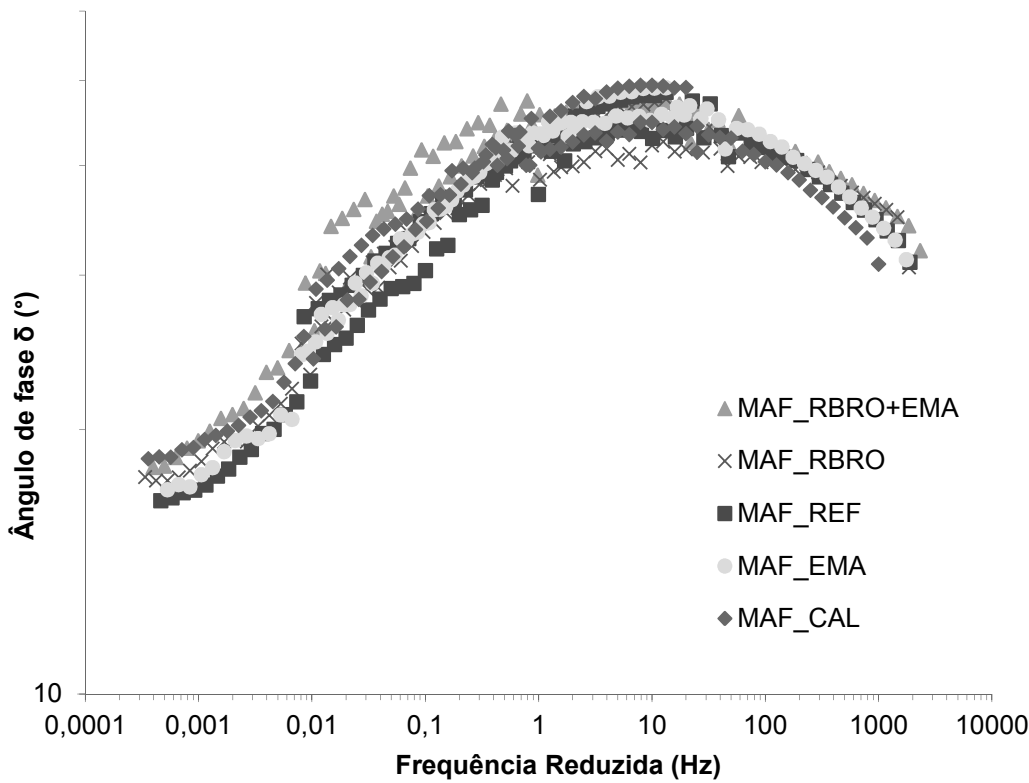
As curvas mestre foram construídas considerando o princípio da superposição tempo-temperatura. Foi utilizado o Software Trios, com escala logarítmica em ambos os eixos, conforme ilustrado na Figura 35 e Figura 36.

Figura 35 – Curvas mestras do $|G^*|$, à 40°C das MAF's



Fonte: Acervo da autora

Figura 36 - Curvas mestras do δ , à 40°C das MAF's



Fonte: Acervo da autora

Pelos resultados apresentados na Figura 35, é possível observar que o tipo de filer tem influência na rigidez das misturas, ou seja, mesmo com mesma composição granulométrica, ao se adicionar materiais com diferentes características, estas irão impactar no módulo complexo. Ressalta-se que os diferentes teores de CAP utilizados para cada mistura também exercem influência no comportamento reológico apresentado nas curvas mestras. Pode-se observar que a MAF_CAL apresentou maior $|G^*|$ em toda a faixa de frequência analisada. Este aumento de rigidez é resultado do efeito combinado entre o menor teor de ligante para esta mistura em relação às outras MAF's e maior concentração de CaO, que contribui para o aumento da rigidez da mistura, ficando mais evidente para altas frequências. Já a MAF_RBRO apresentou menor $|G^*|$, mesmo possuindo teor de ligante inferior a MAF_REF, o que indicaria uma menor rigidez da mistura. Para a MAF_EMA não foi observada uma diferença significativa nas curvas mestras com relação à MAF_REF ao longo de toda a faixa de frequência, mas que se mostra como um bom resultado já que viabiliza a incorporação deste resíduo na mistura asfáltica. Já a MAF_RBRO+EMA apresentou um $|G^*|$ levemente inferior ao de referência para baixas frequências, e muito similar ao de referência para altas frequências.

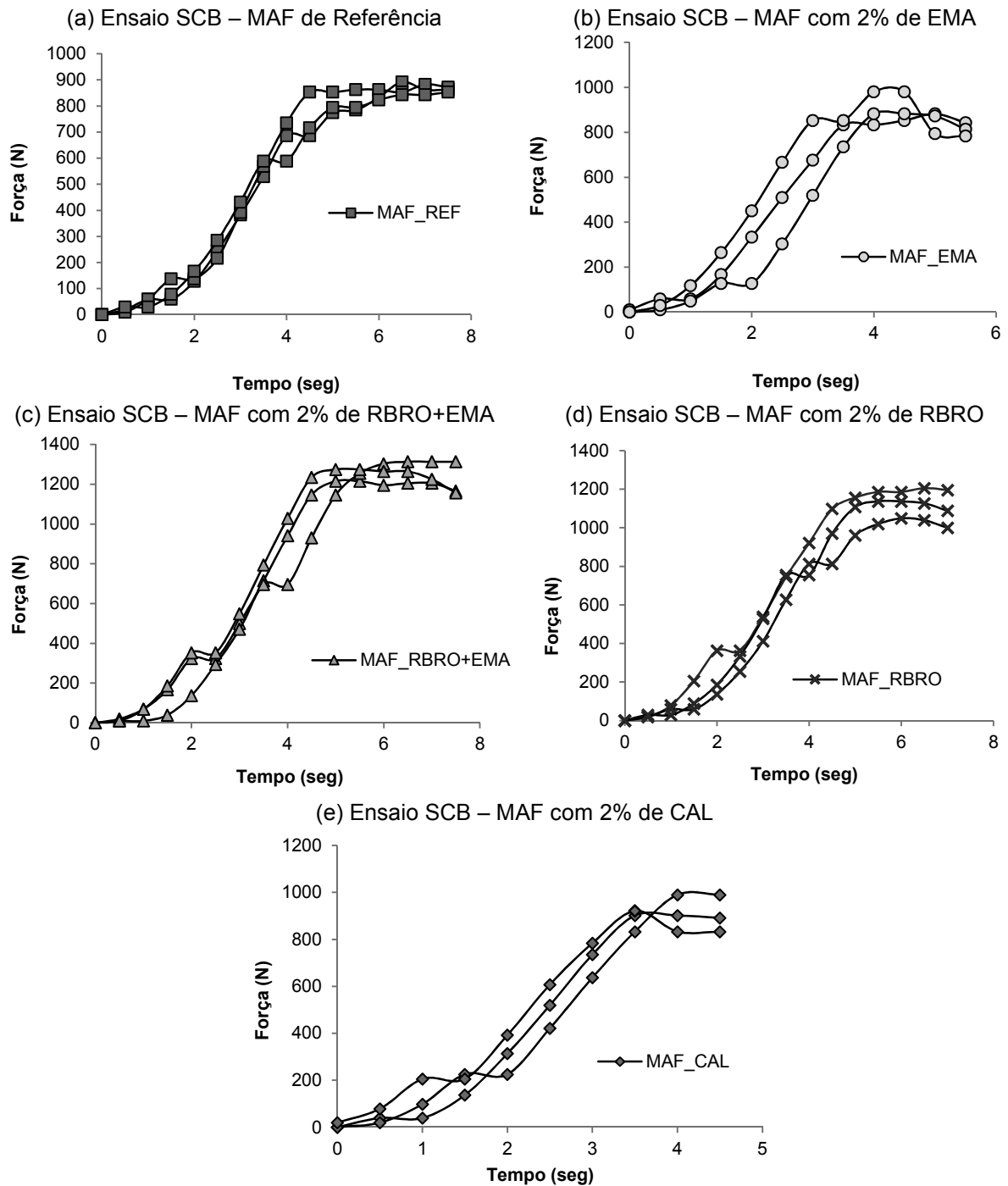
A Figura 36 mostra que, de uma forma geral, para todas as cinco diferentes MAF's, o ângulo de fase primeiramente tem um acréscimo e depois apresenta uma queda com o aumento da frequência. Para altas frequências o δ tende a aumentar à medida que a temperatura aumenta, enquanto que para baixas frequências o δ tende a diminuir à medida que a temperatura aumenta. Observa-se então que a capacidade de recuperação elástica, ou seja, a capacidade de se recuperar de deformações, para todas as MAF's, é maior a baixas frequências, ou altas temperaturas. Os resultados encontrados para o ângulo de fase possuíram uma grande dispersão quando comparados aos encontrados para o módulo dinâmico de cisalhamento, não sendo possível obter conclusões a respeito do efeito do filer na elasticidade das misturas.

4.3 PROPRIEDADES DE FRATURA DAS MAF'S – ENSAIO SCB

O ensaio de flexão em três pontos em amostras semicirculares foi realizado em três amostras para cada uma das cinco misturas analisadas neste estudo. Ressalta-se

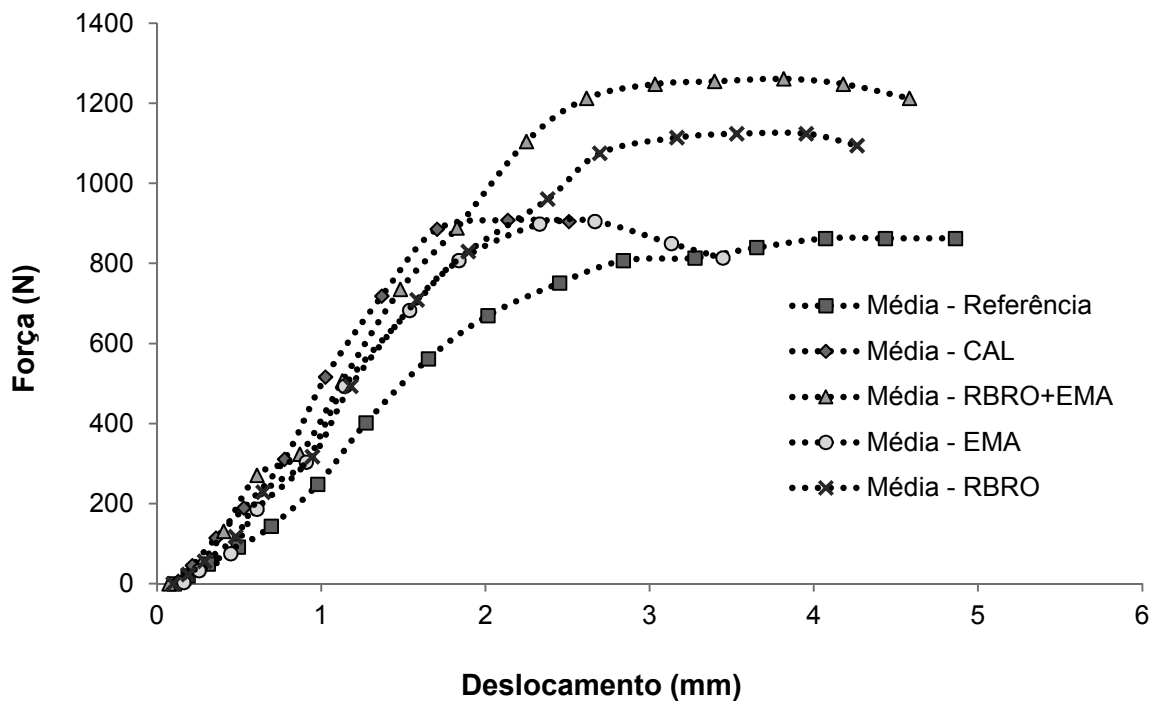
que foi fixada a mesma densidade para todas as amostras estabelecendo-se o volume de vazios em $9,5\pm0,5\%$. O ensaio foi conduzido na temperatura de 25°C e a curva da *força x tempo* foi acompanhada durante a realização do ensaio. A Figura 37 mostra os resultados obtidos para as cinco MAF's estudadas.

Figura 37 – Curvas obtidas com o ensaio SCB



De posse dos resultados é possível construir a curva força x deslocamento do pistão. A partir desta curva, é possível fazer a determinação dos parâmetros $EP_{\text{máx}}$, $(P_{\text{máx}})$ e $(\delta_{\text{máx}})$, já mencionados anteriormente. A Figura 38 apresenta as curvas médias obtidas para cada mistura estudada e na Tabela 18 são apresentados os valores médios dos parâmetros.

Figura 38 – Curvas média (Carga x Deslocamento) obtidas no ensaio SCB



Fonte: Acervo da autora

Tabela 18—Resultados do ensaio de fratura nas MAF's

Mistura	Teor de ligante	Volume de vazios (amostras de SCB)	P _{máx} (N)	δ _{máx} (mm)	EP _{máx} (N.mm)	CV (%)
MAF_CAL	8,89	10	953,04	2,16	1.099,88	7,09
MAF_EMA	9,19	9,8	933,52	2,71	1.417,46	7,43
MAF_REF	9,68	9,7	880,87	4,05	2.224,96	3,46
MAF_RBRO	9,53	9,7	1.157,68	3,55	2.415,91	8,82
MAF_RBRO+EMA	9,19	9,1	1.311,10	3,66	2.888,48	1,16

Fonte: Acervo da autora

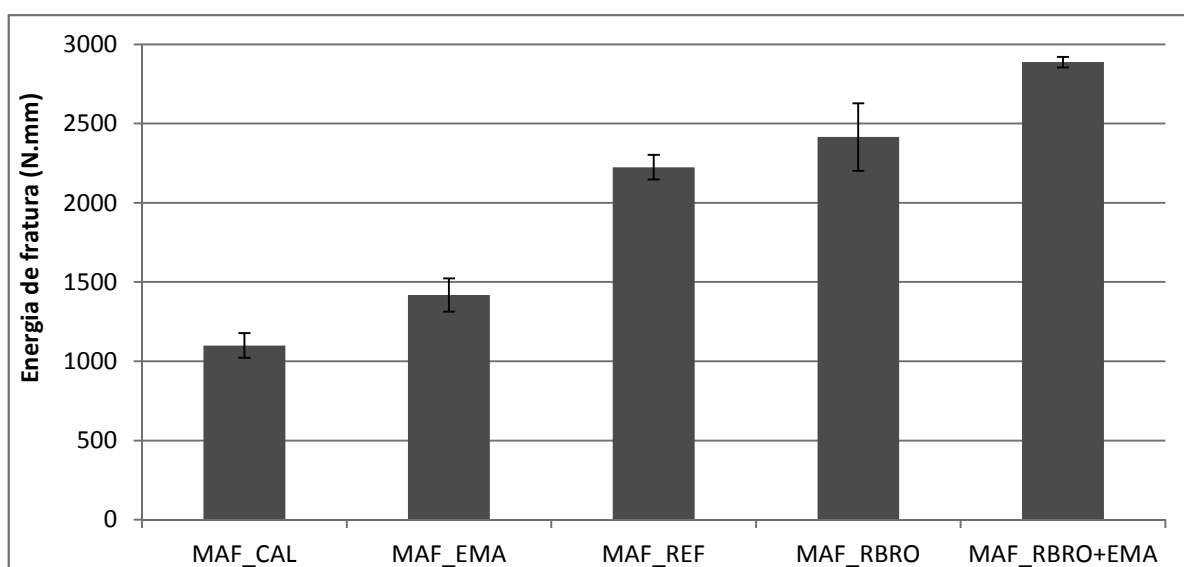
Dos resultados apresentados na Tabela 18 pode-se observar que a MAF_REF apresentou um comportamento semelhante ao de materiais dúcteis, caracterizado pelo menor valor no pico do carregamento e com maiores deformações, enquanto que as MAF's com Cal e com EMA apresentaram comportamento semelhante ao de materiais frágeis, caracterizado por uma menor resistência a deformações plásticas, resultando numa ruptura rápida da amostra. Este comportamento fica bastante evidenciado ao se analisar as energias de fratura. Os valores máximo e mínimo de $\delta_{máx}$ encontrados para as MAF's Referência e com Cal, respectivamente, podem estar relacionados ao teor de ligante das amostras. Freire (2013) mostra que os valores de $\delta_{máx}$ aumentam com o aumento do teor de ligante. No caso das amostras de EMA e RBRO+EMA, apesar de possuírem o mesmo teor de ligante, as MAF's apresentaram comportamentos distintos. Este resultado pode ser atribuído ao efeito do tipo de fíler, influenciando na rigidez da mistura. MAF's com adição de RBRO tendem a possuir menores rigidezes como mostrado nas curvas mestre do módulo complexo, e isto pode estar associado a presença de silicatos no resíduo. No entanto, essa menor rigidez atua de forma positiva na resistência a fratura, como mostrado nos resultados do ensaio de SCB.

A rigidez do material também pode ser analisada através da inclinação inicial das curvas da Figura 37. O que pode ser observado é que as MAF's com resíduos e com CAL apresentaram uma rigidez maior do que a MAF de referência. Entretanto, não é possível fazer diferenciações entre as rigidezes das MAF's com resíduo e CAL. Esse

aumento na rigidez pode estar relacionado ao efeito filler devido à adição de partículas com dimensões médias inferiores a 70 μm , e também a composição química dos fileres, já que os mesmos apresentam altos teores de óxido de cálcio (CaO), composto que atua aumentando a rigidez da mistura asfáltica.

A Figura 39 apresenta os valores médios das energias dissipadas até o ponto de carregamento máximo.

Figura 39 – Média das energias até a carga máxima para cada mistura



Fonte: Acervo da autora

Com relação à energia dissipada durante o ensaio até o ponto de carga máxima, verificou-se que as MAF's com RBRO+EMA seguida da RBRO apresentaram o melhor desempenho segundo este parâmetro, necessitando de uma maior energia para fratura da amostra.

Para dar suporte ao ranqueamento das misturas obtido a partir dos resultados apresentados pelo ensaio SCB e verificar a influência do tipo de filler na susceptibilidade a fratura por fadiga das misturas asfálticas, fez-se necessária a realização de um ensaio de fadiga, visto que essas misturas quando aplicadas em pavimentos asfálticos, estarão sujeitas a um carregamento cíclico/dinâmico com a passagem dos veículos. Ainda assim, os parâmetros de fratura obtidos nesse ensaio são válidos devido à rapidez de execução do ensaio e da fácil obtenção de CP's em campo para controle da mistura após sua aplicação.

4.4 ENSAIO DE VARREDURA DE TEMPO NAS MAF'S

Nesta sessão são apresentados e comparados os resultados obtidos no ensaio de varredura de tempo a tensão controlada para as cinco misturas de MAF. Todos os testes foram realizados na temperatura de 25°C e na frequência de 10 Hz, à tensão controlada de 300 KPa. A análise dos resultados foi feita utilizando o modelo viscoelástico de dano contínuo para a construção das curvas características (C x S) de cada mistura de MAF.

Na primeira etapa do ensaio foi realizado um teste de varredura de frequência para que fosse possível a obtenção, a partir das propriedades viscoelásticas lineares do material, do parâmetro α ($\alpha = 1/m$) que representa a taxa de evolução do dano, apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores do parâmetro α

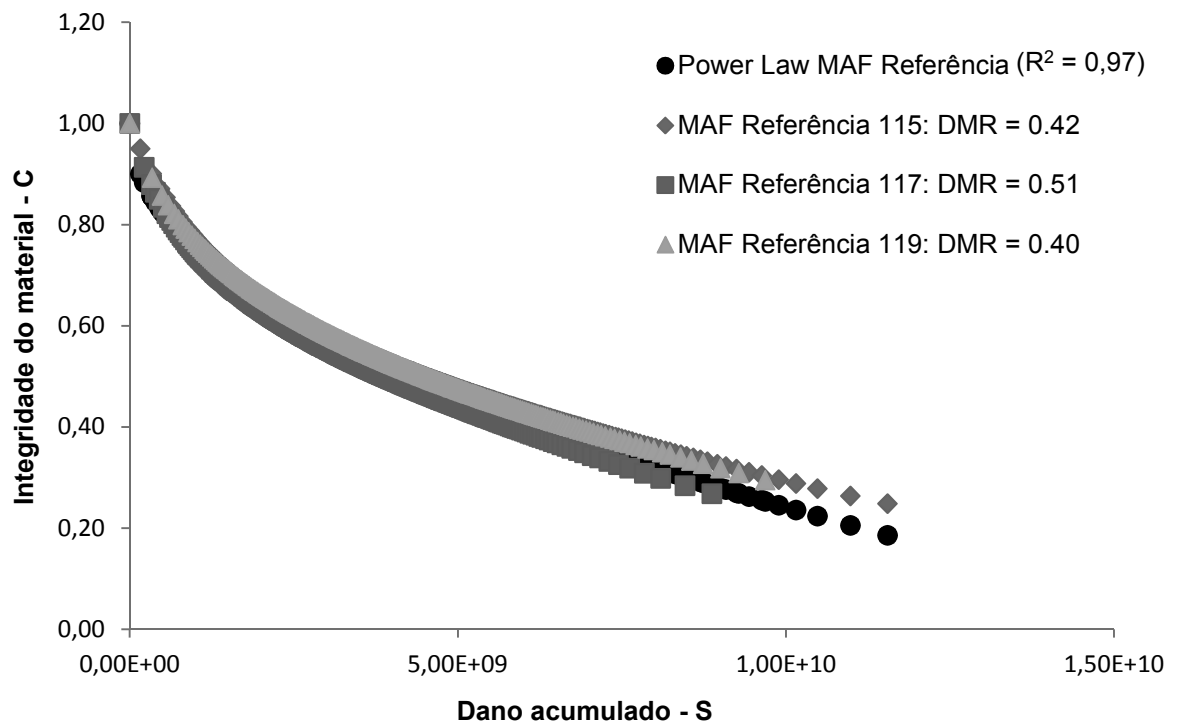
Mistura	% Ligante	α_1	α_2	α_3
MAF_REF	9.68	4,587	4,630	4,630
MAF_CAL	8.89	4,016	4,274	4,405
MAF_RBRO	9.53	4,808	4,975	5,348
MAF_EMA	9.19	4,219	4,831	5,025
MAF_RBRO+EMA	9.19	4,673	5,102	-

Fonte: Acervo da autora

Com os resultados obtidos no ensaio de varredura de tempo à tensão controlada foi possível construir a curva C x S, que representa a evolução do dano acumulado à medida que a integridade do material diminui durante o carregamento cíclico. O teste foi encerrado logo após a ruptura da amostra, representada pela queda acentuada da curva do ângulo de fase pelo tempo. Para cada mistura foram ensaiadas três amostras, porém uma das amostras das misturas de MAF_RBRO+EMA apresentou problemas experimentais, sendo descartada da análise. Nas Figura 40 - Figura 44 são apresentados os resultados dos ensaios obtidos para todas as misturas. Além dos resultados, é apresentada a Power Law gerada por regressão matemática para cada uma delas. As curvas das diferentes amostras para cada tipo de mistura

apresentaram-se semelhantes entre si, estando de acordo com o descrito na teoria (Daniel e Kim, 2002 apud Freire, 2015).

Figura 40 - Curva característica do dano - MAF Referência



Fonte: Acervo da autora

Figura 41 - Curva característica do dano - MAF CAL

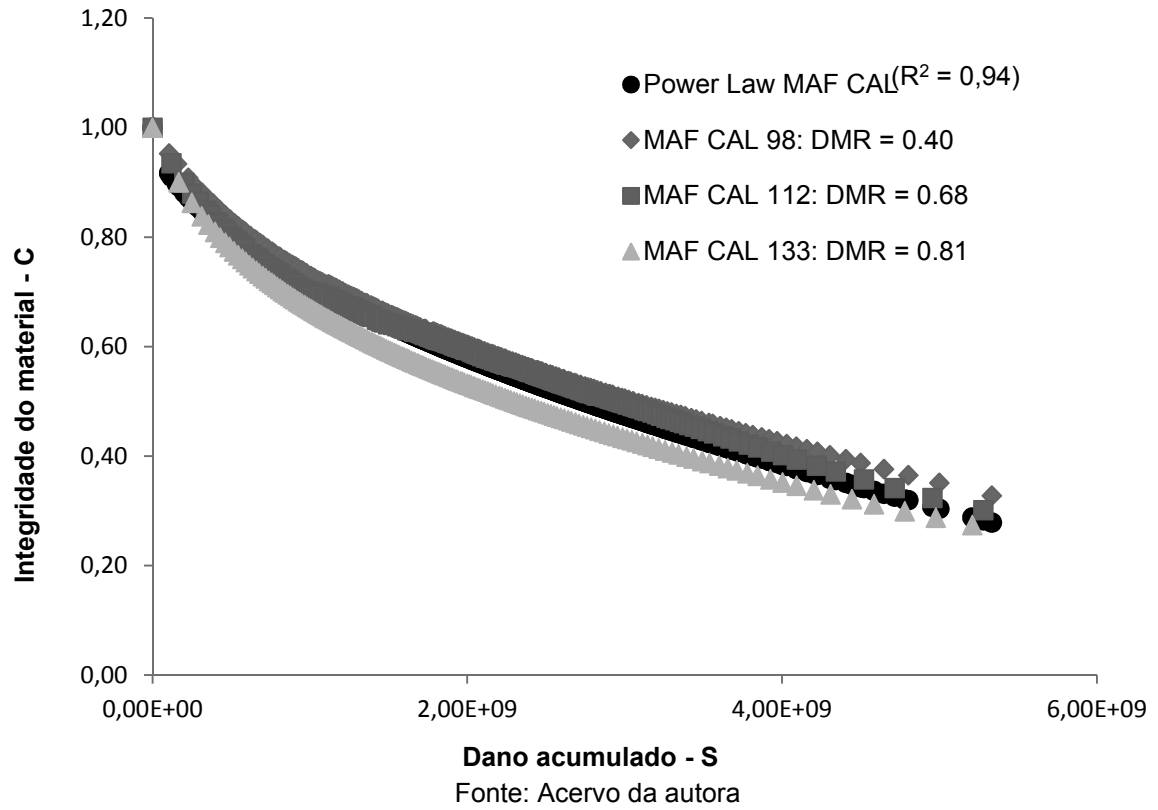


Figura 42 - Curva característica do dano - MAF RBRO+EMA

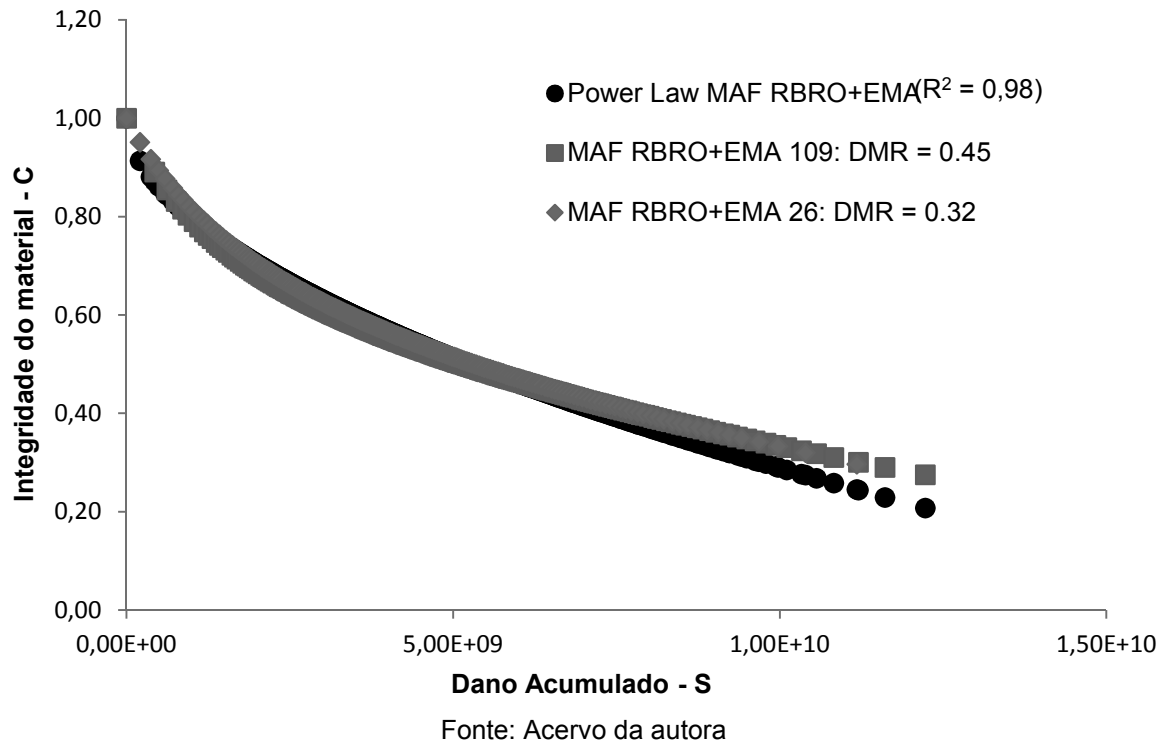
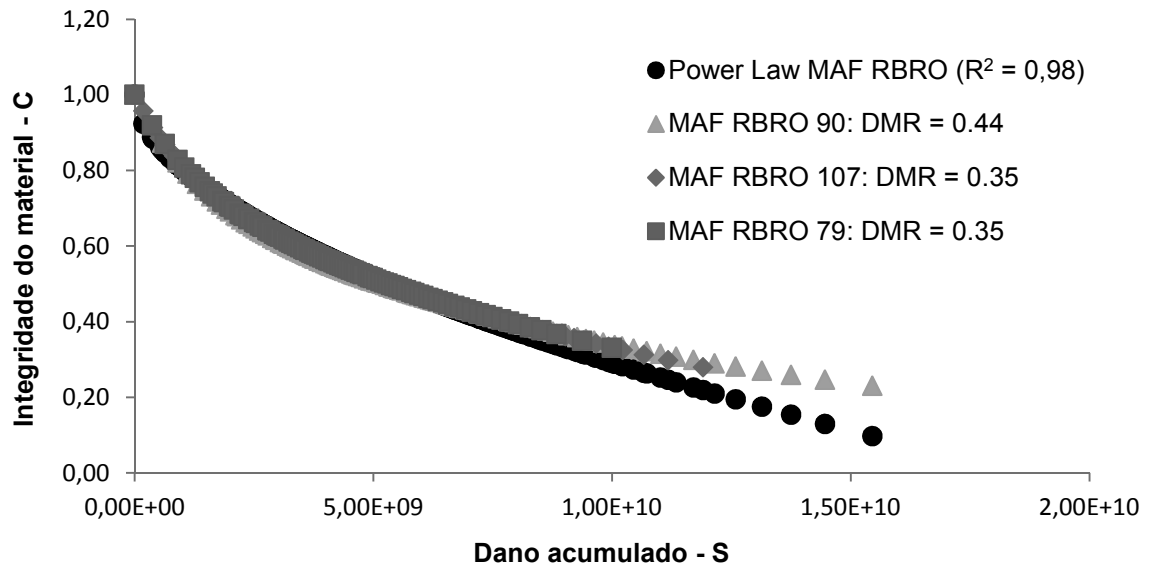
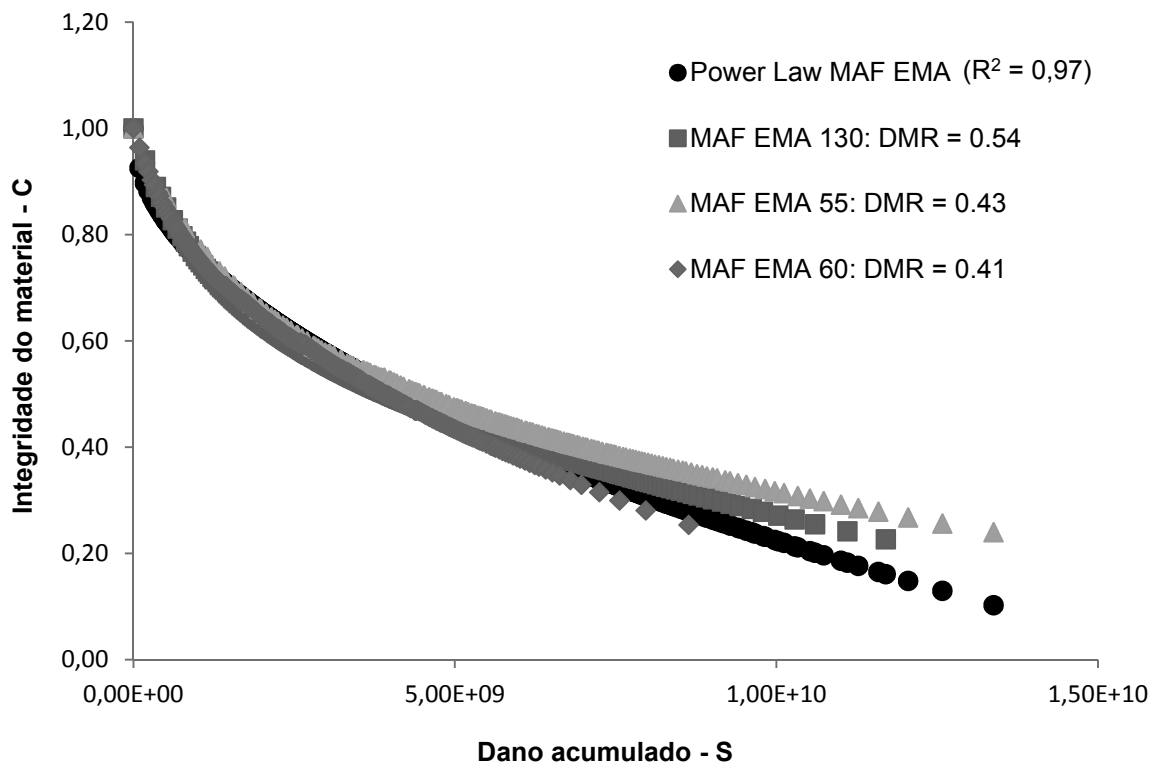


Figura 43- Curva característica do dano - MAF RBRO



Fonte: Acervo da autora

Figura 44- Curva característica do dano - MAF EMA



Fonte: Acervo da autora

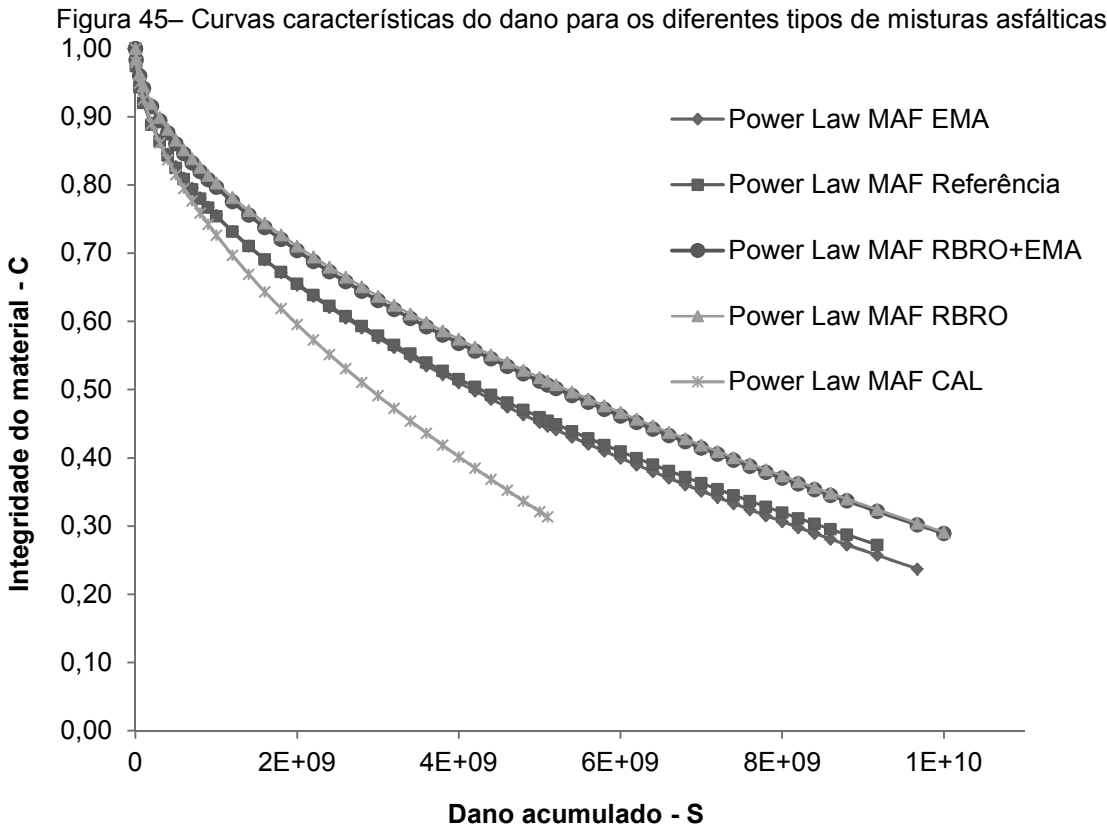
Os coeficientes estimados para *Power Law* (C11 e C12) representativa de cada mistura asfáltica analisada encontram-se na Tabela 20. Com os coeficientes é possível fazer a comparação entre as curvas características de dano de cada

mistura, ilustradas na Figura 45. As curvas foram plotadas até seu respectivo valor médio da integridade do material no momento da ruptura da amostra (indicados na Tabela 21).

Tabela 20 – Coeficientes da Power Law – C11 e C12

Mistura	C ₁₁	C ₁₂
MAF_REF	9.58E-06	4.90E-01
MAF_CAL	3.20E-06	5.50E-01
MAF_RBRO	1.94E-06	5.56E-01
MAF_EMA	7.55E-06	5.01E-01
MAF_RBRO+EMA	2.59E-06	5.44E-01

Fonte: Acervo da autora



Fonte: Acervo da autora

Tabela 21 - Média e coeficiente de variação da integridade do material (C_f) e dano acumulado (S_f) na ruptura

Mistura	Média do C_f	CV (%)	Média do S_f	CV (%)
MAF_REF	0,27	6,98	9,17E+09	12,22
MAF_CAL	0,30	7,32	5,10E+09	0,99
MAF_RBRO	0,28	14,60	1,04E+10	21,75
MAF_EMA	0,24	4,64	9,67E+09	20,30
MAF_RBRO+EMA	0,29	3,81	1,00E+10	5,24

Fonte: Acervo da autora

Da comparação das curvas características de dano pode ser observado que as MAF's com RBRO e RBRO+EMA possuem curvas muito semelhantes, assim como as MAF's de Referência e com EMA. A MAF com CAL é claramente a mistura que tem sua integridade mais reduzida para pequenas quantidades de dano. Essa tendência também pode ser observada na Tabela 21 pelos valores de C_f e S_f , onde as amostras de MAF com RBRO e RBRO+EMA são as que possuem o maior valor para a integridade do material e o maior acúmulo de dano no momento da ruptura, seguidas das amostras com EMA e de Referência. Já a amostra de CAL, apesar de apresentar o maior C_f é a que se rompe com o menor valor de S_f , o que indica que esta mistura teve uma menor tolerância ao dano por fadiga. Estes resultados corroboram com os encontrados nos ensaios de FS e SCB, onde as misturas com menor rigidez (MAF_RBRO e MAF_RBRO+EMA), observada pelo ensaio de FS, apresentaram melhor desempenho no ensaio SCB (maior energia necessária para fratura), enquanto que a mistura com maior rigidez (MAF_CAL), apresentou pior desempenho no ensaio SCB. A maior rigidez da MAF_CAL associada tanto a sua composição química, quanto ao tamanho menor de suas partículas, e ao menor teor de ligante utilizado nesta mistura, atua de forma negativa quando se analisa a suscetibilidade à fadiga. Alguns estudos passados mostram que os efeitos de aumento da rigidez da adição de Cal em misturas asfálticas são minimizados a temperaturas baixas (abaixo da temperatura ambiente) (JOHANSSON e ISACSSON, 1998; LACJNER et al., 2005; LESUEUR et al., 2013), resultando na diminuição da suscetibilidade à fadiga. Contudo, este efeito não foi avaliado na presente pesquisa, uma vez que não foram realizados ensaios à temperatura abaixo da ambiente.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DA MAF, CA E MÁSTIQUE

Neste item é abordada a relação entre as características do comportamento do concreto asfáltico com suas correspondentes MAF's e mástiques, comparando os resultados obtidos neste estudo com os encontrados por Cosme (2015) e Gottardi (2015).

No Quadro 2 é apresentado um resumo do desempenho encontrado para os diferentes tipos de MAF's analisadas neste trabalho e também para os diferentes mástiques e concretos asfálticos. Percebe-se que a mistura RBRO+EMA foi a que apresentou melhor desempenho geral se avaliado tanto a suscetibilidade à deformação permanente quanto à fratura e o mesmo comportamento pôde ser observado nos ensaios realizados no CA e no mástique.

Quadro 2 – Resumo do desempenho dos diferentes tipos de MAF's

Escala analisada	Ensaio	Propriedade Medida	Resistência à deformação Permanente	Resistência à Fratura por Tensão incremental	Resistência à Fratura por Fadiga
MAF	Varredura de Frequência	Módulo Complexo, G*	Cal>EMA>RBRO+EMA>Ref>RBRO (altas frequências) Sem diferença significativa (baixas frequências)	-	-
		Ângulo de Fase, δ	Não houve diferença	-	-
	SCB	Energia Dissipada, EPmáx	-	RBRO+EMA>RBRO>Ref>EMA>Cal	-
	Varredura de Tempo	Curva característica do dano	-	-	RBRO+EMA=RBRO>Ref=EMA>Cal
Mástique (COSME, 2015)	Varredura de Frequência	Módulo Complexo, G*	RBRO+EMA>EMA>RBRO>LA	-	-
	Fluência e Recuperação sob tensões múltiplas	% Recuperação	RBRO+EMA>EMA>LA>RBRO	-	-
CA (GOTTARDI, 2015)	Resistência à tração por compressão diametral	Resistência à tração (MPa)	-	RBRO+EMA>CAL>REF>RBRO=EMA	-
	Estabilidade e Fluência Marshall	Carga aplicada (Kgf)	-	EMA>RBRO+EMA>CAL>REF>RBRO	-
		Deformação (mm)	RBRO+EMA=RBRO>EMA>CAL>REF	-	-

Fonte: Acervo da autora

Os resultados encontrados por Cosme (2015) são referentes aos mástiques com adição de resíduos com relação $f/b=0,36$ e para o ligante asfáltico puro (CAP 50/70). De acordo com o apresentado pelo autor, analisando-se o comportamento do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) ao longo da frequência reduzida para a temperatura de referência de 40°C , observa-se que a adição de resíduos atua aumentando a rigidez dos mástiques, como esperado. No entanto, diferentes fileres atuam de forma distinta no incremento do módulo complexo. A combinação de RBRO+EMA resultou em mástiques com maior rigidez, e o resíduo de RBRO sozinho apresentou menor incremento no módulo complexo em relação ao CAP puro. Cosme (2015) sugere que esse aumento na rigidez do material pode ser atribuído a adição de fíler quanto também pelos efeitos químicos de compostos como CaO e Fe_2O_3 , que atuam aumentando a rigidez do material. Em geral, há um aumento significativo do G^* nas amostras com presença do resíduo de escória de aciaria (EMA) e da mistura EMA/RBRO, provavelmente ocasionado pelo alto teor de Fe_2O_3 quando comparado ao resíduo puro de RBRO. Levando-se em consideração os valores de percentuais de recuperação (R) e do módulo complexo dinâmico ($|G^*|$) pode-se concluir que o mástique EMA+RBRO apresentou menor suscetibilidade à deformação permanente, pois apresentou maiores percentuais de recuperação e maior $|G^*|$.

Os resultados encontrados por Gottardi (2015) são referentes aos concretos asfálticos com substituição de fileres em 2% e ao concreto asfáltico de Referência. Considerando os resultados apresentados para o ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral, é possível observar o melhor desempenho do CA com RBRO+EMA, apresentando a RT aproximadamente 10% superior ao CA de Referência, ou seja, apresentando maior resistência ao carregamento. Pode-se observar dos resultados do ensaio de estabilidade Marshall, que mais uma vez o CA com 2% de RBRO+EMA demonstrou bons resultados, ficando superior às misturas de Referência e 2% de RBRO e similar a de 2% de EMA e 2% de Cal. Com relação à fluência, a mistura com RBRO+EMA, assim como a mistura com RBRO, apresentaram o melhor desempenho, devido terem apresentado os menores valores de deformação.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação dos efeitos da substituição dos diferentes tipos de fíleres na matriz de agregados finos (MAF), com a finalidade de analisar o potencial de reutilização do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e da Escória Moída de Aciaria (EMA). Análises sobre a rigidez da mistura, propriedades de fratura e trincamento por fadiga foram conduzidas em amostras de MAF.

Pôde-se concluir, através da análise das características químicas, físicas e mineralógicas, que o RBRO, a EMA e a Cal possuem granulometria de fíleres. O fíler de EMA apresenta partículas com maior diâmetro e densidade, seguido do fíler de RBRO. Já a Cal apresenta a menor densidade e também partículas mais finas, fator que pode ter contribuído para a maior rigidez apresentada. A sílica, composto que pode prejudicar na adesividade entre agregado e ligante, foi observado em ambos os resíduos, sendo encontrado em maiores concentrações para o RBRO. A presença de óxido de ferro foi observada na composição do fíler de EMA, podendo ter contribuído para o aumento da rigidez da MAF. Pôde-se observar a presença de óxido de cálcio em todos os fíleres, composto que também pode estar relacionado ao aumento da rigidez, estando em maior concentração na Cal, seguida do RBRO e EMA. Quanto às micrografias foi encontrada uma tendência mais lamelar ao fíler de RBRO e mais anguloso para o fíler de EMA.

Com relação à metodologia de dosagem empregada, concluiu-se que o procedimento apresenta boa repetibilidade e facilidade de desenvolvimento em laboratório, além de ter mantido a proporcionalidade do teor de ligante entre o CA e as MAF, das diferentes misturas, e também da constância do incremento de ligante do CA para a MAF independente do tipo de fíler utilizado.

Quanto às características viscoelásticas lineares obtidas pelo ensaio de varredura de frequência, pôde-se concluir que não houve diferenciação entre a rigidez (analisada pelo $|G^*|$) das misturas para baixas frequências, enquanto que para altas frequências é possível notar diferenças entre as misturas, onde a MAF com Cal

apresentou maior rigidez e a MAF com RBRO a menor rigidez, ao passo que as demais MAF's apresentaram rigidezes intermediárias.

Pôde-se concluir em relação às propriedades de fratura obtidas no ensaio SCB, considerando energia máxima dissipada, carregamento até o pico e deformação máxima, que a MAF com Cal seguida da MAF com EMA são as que apresentaram menor desempenho devido à baixa energia dissipada até o carregamento de pico e apresentaram comportamento de materiais frágeis, provavelmente relacionado a sua composição química. Já para amostra com RBRO+EMA concluiu-se que esta teve o melhor desempenho, atingindo a maior carga de pico e suportando grandes deformações, seguida da MAF RBRO e Referência.

Análises utilizando o modelo simplificado viscoelástico de dano contínuo puderam ser feitas através de dados obtidos do ensaio de varredura de tempo para diferentes tipos de misturas, e como resultado, foram geradas curvas características de dano ($C \times S$) onde comparações relativas a integridade pelo acúmulo do dano até a ruptura puderam ser realizadas. Mais uma vez, a mistura de RBRO+EMA apresentou o melhor desempenho entre as demais, apresentando comportamento similar à mistura com RBRO.

No geral, foi possível fazer uma correlação do desempenho dos diferentes tipos de misturas analisadas para diferentes escalas (concreto asfáltico, MAF e mástiques). Em todas as escalas avaliadas a mistura com RBRO+EMA apresentou resultados superiores a mistura de Referência e resultados melhores ou similares as demais misturas estudadas, indicando uma possível aplicação destes resíduos em conjunto para melhoramento das propriedades de pavimentações asfálticas. Além disso, os resultados para as MAF's se mostraram coerentes com relação ao observado para o concreto asfáltico, reafirmando as motivações pelo desenvolvimento de seu emprego para análise e previsão do comportamento de misturas asfálticas.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A partir dos resultados e conclusões obtidos na presente pesquisa sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar os efeitos da incorporação dos resíduos estudados em amostras de MAF envelhecidas;
- Avaliar se há diferenças no desempenho de misturas asfálticas que utilizem em sua composição resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais de diferentes localizações de origem assim o como resíduo de diferentes composições mineralógicas (Granito ou Mármore);
- Analisar a influência de diferentes volumes de vazios das MAF's em seu comportamento mecânico e reológico;
- Avaliar o desempenho mecânico e reológico de MAF's com diferentes percentagens de substituições de resíduos de RBRO e EMA;
- Avaliar se as dimensões das amostras semi-circulares para ensaio SCB obtidas a partir de corpos-de-prova moldados no compactador Marshall são suficientes para um elemento de volume representativo;
- Avaliar a influência nas características de fratura de diferentes taxas de carregamento utilizados no ensaio SCB para corpos-de-prova obtidos a partir do compactador Marshall.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais **“Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013”**. Disponível em:<

http://www.ivololution.com.br/mais/fotos/6/17/3342/Informe_13_2014.pdf>Acesso em: 20 de dezembro. 2014.

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais **“ABIROCHAS em Notícias - ABINEWS”**. Disponível em:<
https://issuu.com/abirochas/docs/abirochas_noticia_2. 2015.

ALENCAR, A. E. V. (2009) **Avaliação do uso de polímero EVA, resíduo da indústria de calçados (EVAR) e aditivos no desempenho reológico de ligante asfáltico de petróleo**. 166 f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

ALVAREZ, H. I. P. (2004) **Ensaio não convencionais para determinação da tenacidade à fratura em rochas: Análise e Comparação**. 238 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ANITELLI, A. (2013) **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ARAGÃO, F. T. S. (2011). **Computational Microstructure Modeling of Asphalt Mixtures Subjected to Rate-Dependent Fracture**. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia civil) – University of Nebraska, Lincoln.

ARAGÃO, F. T. S.; HARTMANN, A. D.; KIM, Y. R.; MOTTA, L. M. G.; JAVAHERIAN, M. H. (2014) Numerical experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low in-service temperatures. Transportation Research Board.

BABADOPULOS, L. F. A. (2014) **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M. & FERNANDES, J.L. (2010) A importância do filler para o bom desempenho de misturas asfálticas. *Minerva*, 7(1): 71-78.

BARDINI, V.S., KLINSKY, L.M. & FERNANDES, J.L. (2012) Influência do filler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. **TRANSPORTES**, v. 20, n. 4, p. 19-26.

BARDINI, V. S. S. (2013) **Influência do filler mineral em propriedades de misturas asfálticas densas**. 344 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte e Área de concentração em Infraestrutura de Transporte. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B.; BARROSO, S. H. A. (2014) Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico a partir de ensaios acelerados e instrumentação em campo. *XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Curitiba, Paraná.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2006) Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras & ABEDA.

BETIOLI, A. M. (2007) **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 188 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade de Santa Catarina, Florianópolis.

BILIGIRI, K. P.; SAHA, G. (2016) Fracture properties of asphalt mixtures using semicircular bending test: A state-of-the-art review and future research. *Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp. 103-112.

BONET, I. I. (2002) **Valorização do resíduo areia de fundição (RAF). Incorporação nas massas asfálticas do tipo C. B. U. Q.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. (2009) Análise da susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos através da energia de ativação de fluxo. *TRANSPORTES*. V. XVII, n. 1, p. 46-52.

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; SOUZA, F. L. S.; SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. (1997) Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas de assentamento. In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 2, 1997, Salvador: ANTAC, p. 64-75.

CALMON, J. L.; SILVA, S. A. C. (2006) Mármore e granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: Domingues, A. F.; Boson, P. H. G.; Alépaz, S. (Org.). **A gestão dos recursos hídricos e a mineração**. Brasília. Agência Nacional das Águas e Instituto Brasileiro de Mineração. Capítulo 5, p. 199-231.

CASTELO BRANCO, V.T.F. (2004) **Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro.

CASTELO BRANCO, V. T. F. (2004) **Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTELO BRANCO, V.T.F. (2008) **An Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixes Using the Dynamic Mechanical Analyzer**. 240 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Texas A&M University. College Station, TX.

CAVALCANTE, V.T.F.; SOARES, J.B. (2001). O efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, 33a Reunião anual de pavimentação, ABPv, Florianópolis, SC, 1: 507- 518.

CHEN, J. S.; PENG, C. H. (1998). "Analyses of tensile failure properties of asphalt-mineral filler mastics." J. Mater. Civ. Eng., 10(4), 256–262.

CHEUNG, C.Y. (1995) Mechanical Behavior of Bitumens and Bituminous Mixtures. Tese de Doutorado, University of Cambridge. Cambridge, UK.

CHIODI FILHO, C. (1995). Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais. Série Estudos e Documentos, nº 28 75 págs. Rio de Janeiro: CNPQ/CETEM.

CHONG, K.P. e KURUPPU, M.D. (1984) New Specimens for Fracture Toughness Determination for Rock and Other Materials. International Journal of Fracture.

CHONG, K.P. e KURUPPU, M.D. (1988) New Specimens for Mixed Mode Fracture Investigations of Geomaterials, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 30, No. 5, 701-712.

COSME, R. L. (2015) **Estudo Reológico de Mástiques com Fíler de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO e Escória de Aciaria (EMA))**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

COUTINHO, R.P.; PAMPLONA, T.F.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; MATEOS, A. (2010) Multiscale Approach for Characterization of Asphaltic Materials

Designed in Brazil and Spain. 11th International Conference on Asphalt Pavements – ISAP, Japão.

COUTINHO, R.P.; BABADOPULOS, L.F.A.L.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. (2011) *Proposição de um Novo Método de Dosagem para Representação da Parte Fina de Misturas Asfálticas*. XVI CILA, Rio de Janeiro, RJ.

COUTINHO, R. P. (2012) **Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

DNIT 005/2003 – TER Defeito nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Origem: Revisão da norma DNER-TER 001/78.

DNIT 031/2006 - ES DNIT Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Origem: Revisão da norma DNIT 031/2004 – ES.

FARIA, R. A. F. (2007) **Contribuição ao estudo das propriedades mecânica e da durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo**. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal Goiás, Goiânia.

FERNANDES, M.W.Q. (2007) **Utilização de resíduos sólidos no estudo da susceptibilidade das misturas asfálticas a presença d'água**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FREIRE, A. S.; MOTTA, J. F. M. (1995) Potencialidades para o aproveitamento econômico do rejeito da serragem do granito. *Revista Rochas de Qualidade*. São Paulo. Ano XXV. Edição 123, p.98-108.

FREIRE, R. A. (2015) **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with diferente maximun nomina size**. 97

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

FREITAS, R.D. (2010) **Efeitos da adição de resíduos de gesso da indústria da construção nas propriedades mecânicas do concreto asfáltico usinado à quente**. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande.

FONTES, L. P. T. L. (2009) **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. 545 f. Tese de Doutorado. Universidade do Minho/ Universidade Federal de Santa Catarina.

GONÇALVES, J.P. (2000) **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

GOTTARDI, E. V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. (2013). Aproveitamento do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico usinado a quente. 19ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT.

GOTTARDI, E. V. (2015) **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

GOUVEIA, F. P. (2013) **Efeito da Adição de Fíler Gesso nas Propriedades dos Ligantes Asfálticos e Concretos Asfálticos**. 159 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

HIRSCH, F. (2009) **Avaliação das propriedades de fratura de misturas asfálticas através de ensaio de tração em disco circular com fenda**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

IEL – Instituto Euvaldo Lodi. Mercado Internacional de Rochas Ornamentais. Relatório Final, 1996.

IM, S. (2012) **Characterization of viscoelastic and fracture properties of asphaltic materials in multiple length scales**. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). University of Nebraska, Lincoln.

IZADI, A.; MOTAMED, A.; BHASIN, A. (2011) Designing Fine Aggregate Mixtures to Evaluate Fatigue Crack-Growth in Asphalt Mixtures. Technical Report. The University of Texas at Austin.

IZADI, A. B. S. (2012) **Quantitative Characterization of Microstructure of Asphalt Mixtures to Evaluate Fatigue Crack Growth**. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – The Graduate School of The University of Texas at Austin.

JOHANSSON, L. S.; ISACSSON, U. (1998) Effect of filler on low temperature physical hardening of bitumen. Construction and Building Materials.

KARASAHIN, M.; TERZI, S. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. Construction and Building Materials, 2007 Mar, Vol.21(3), pp. 616-620.

KARKI, P. (2010) **Computational and experimental characterization of bituminous composites based on experimentally determined properties of constituents**. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – The Graduate College at the University of Nebraska, University of Nebraska, Lincoln.

KARKI, P. (2014) **An Integrated Approach to Measure and Model Fatigue Damage and Gealing in Asphalt Composites**. 1429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The Graduate School of The University of Texas at Austin, Texas.

KIM, Y.R.; LITTLE D.N.; SONG I.I. (2003) Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistance and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, 1-8.

KIM, Y.R.; LITTLE D.N.; SONG I.I. (2005) Development of specification-type tests to assess the impact of fine aggregate and mineral filler on fatigue damage. Technical Report. The Texas A&M University System.

KÜTÜK-SERT, T.; KÜTÜK, S. (2013). **Physical and marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete**. Journal of materials in civil engineering. Vol. 25, p 266-273.

LACKNER, R.; SPIEGI, M.; BLAB, R.; EBERHARDSTEINER, J. (2005) Is Low-Temperature Creep of Asphalt Mastic Independent of Filler Shape and Mineralogy? – Arguments from Multiscale Analysis. Journal of Materials in Civil Engineering.

LEITE, L. F. M.; MOTTA, L. M. G. (2002) **Efeito do filler nas características do ligante asfáltico**. Anais do XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET), Rio de Janeiro.

LESUEUR, D.; PETIT, J.; RITTER, J. H. (2013) The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art-review. Road Materials and Pavement Design.

LI, R.; KARKI, P.; HAO, P.; BHASIN, A. (2015) Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts. Construction and Building Materials, Vol. 96, pp. 47-54.

LI, X-J.; MARASTEANU. M. O. (2010) Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. Construction and Building Materials. Society for Experimental Mechanics.

LIBERATORI, I. A.; CONSTANTINO, R. S. (2006) Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas – Estado da Arte. 18° Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro.

LIM, I. L., JOHNSTON, I. W., e CHOI, S. K. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. Engineering Fracture Mechanics, 44(3), 363-382.

LUCENA, L. C. F. L. (2009) **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filer em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande.

LUCENA, A. E. F. L. (2008) **Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas.** Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LUTIF, J. E. S. (2011) **Computational micromechanics modeling of damage-dependent bituminous composites based on two-way coupled multiscale approach.** 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The Graduate College at the University of Nebraska, University of Nebraska, Lincoln.

MARASTEANU, M. et al. (2007) Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements – A Transportation Pooled Fund Study. Technical Report. University of Minnesota.

MARQUES, G. L. O. (2004) **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória.** 461 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de

Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MARTINEZ, J. G. B. (2014) **Avaliação de desempenho de misturas betuminosas com adição de lodos de eta e de ete**. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MARTINS, A. T. (2014) **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEURER, P. et al. (2015) Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação. 44^a Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu, Paraná.

MOTA, J. D. et al. (2011) Aproveitamento dos resíduos de granito e caulim como materiais aditivos na produção de tijolos ecológicos. Campus Universitário, Bodocongó. Campina Grande, Paraíba.

MOTAMED, A.; Bhasin, A.; IZADI, A. (2012) “Fracture Properties and Fatigue Cracking Resistance of Asphalt Binders”, Report N° SWUT/12/161122-1, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin, USA.

MOTTA, L. M. G. e LEITE, L. M. F. (2000) Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. XI PANAM; Brasil; p. 09-19.

MOURA, A. W.; LIMA, M. B. L.; GAMA, J. L. C. N.; MORATTI, M.; SOUZA, F. L. S. (2006) Utilização de Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais (RSRO) como Substituição Parcial do Cimento na Produção de Blocos Pré-Moldados de Argamassa. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Florianópolis, Santa Catarina.

MOURA, E. (2010) **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MUGAYAR, A. N.; BALBO, J. T.; SACHET, T.; PINTO, P. C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. (2009) Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado com rolo. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABPv.

NABIZADEH, H. (2015) **Viscoelastic, fatigue damage and permanente deformation characterization of high RAP bituminous mixtures using Fine Aggregate Matrix (FAM)**. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Nebraska, Lincoln.

NASCIMENTO, C. R. (2007) Parte VII – Escoamento de fluídos: Capítulo 25 – Ensaio em reômetro rotacional tipo cilindros coaxiais. In: SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. P. 423-447. ISBN 978-85-61121-02-0.

PINILLA, A. (1965) O sistema fíler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas. Conselho Nacional de Pesquisas. Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

POLESE, M. O. (2007) **Estudo da Expansibilidade e da Microestrutura de Escórias de Aciaria LD e EAF**. 295 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

REIS, A. S.; ALVAREZ, C. E. (2007) A sustentabilidade e o resíduo gerado no beneficiamento das rochas ornamentais. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 4., 2007, Mato Grosso do Sul. Anais... Mato Grosso do Sul: ELECS. p. 511-520.

SCHULTZ, M. A.; STRUBLE, L.J. (1993) Use of oscillatory shear to study flow behavior of fresh cement paste. **Cement and Concrete Research**, v.23, p.273-282.

SILVA, H. N. (2009) **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos**. 2009. 191 f. Dissertação (mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.

SOUZA, E. B. O. (2007) **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SOUZA, F. V. (2005) **Modelo multi-escala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano**. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SOUZA, J. N.; RODRIGUES, J. K. G.; SOUZA NETO, P. N. (1998). *Utilização do Resíduo Proveniente da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfálticos Usinados a Quente*. Federação das Indústrias do Estado do Ceará – IEL.

SOUZA, P. C. (2010) **Automated protocol for analysis of dynamics mechanical analyzer data from fine aggregate asphalt mixes**. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Texas A&M University.

TWI, Thomas White Internation Report, 2010.

ULIANA, J. G. (2014) **Tratamento térmico da Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais: Aplicação como pozolana em matrizes cimentícias**. 212 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R. (2013) Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 672-681.

VITORIA STONE FAIR. Disponível em:
<<http://www.vitoriastonefair.com.br/site/2015/pt/setor>> Acesso em: Março. 2014.

WU, Z.; MOHAMMAD, L. N.; WANG, L. B.; MULL, M. A. (2005) Fracture Resistance Characterization of Superpave Mixtures Using the Semi-Circular Bending Test.. ASTM Symposium on Performance of Hot Mix Asphalt (HMA), including Fundamental and Empirical Procedures. Tampa, FL.

ZOLLINGER, C. (2005) **Application of Surface Energy Measurements to Evaluate Moisture Susceptibility of Asphalt and Aggregates**. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University. College Station, TX.